



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
Departamento de Economía y Administración de empresas

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA APLICACIÓN MÓVIL PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN UNA SMART CITY

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Mención en Sistemas de Innovación y Competitividad Tecnológica

Autora: Tatiana Brunoldi Pérez

Tutor: D. José Juan Nebro Mellado.

MÁLAGA, octubre de 2025



AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermana, los motores y pilares de mi vida, quienes me han acompañado, apoyado, levantado en cada caída y que siempre han creído en mí pese a cualquier circunstancia dándome su amor incondicional en cada paso que he dado. Siempre sintiéndose orgullosos de mí y alentándome e inspirándome con sus palabras. Sin ellos, no estaría aquí.

A mi familia, que siempre están ahí para impulsarme, darme su apoyo y creer en mí. En especial a mi Tita Lale, quien me ha acompañado siempre en todas mis etapas, siendo una parte incondicional de mi vida.

A todas esas personas que conocí en la carrera, que han marcado momentos bonitos en mi vida, pero especialmente a mis niñas, que me han acompañado desde el primer día hasta el último. Estoy agradecida por estos años tan intensos y por ir de la mano juntas en todo lo que la vida nos ha planteado; de ellas me llevo su cariño, amistad y los recuerdos más bonitos de la carrera.

A mis amigos de siempre, que siempre han estado ahí para escucharme, aunque no entendieran de qué les hablaba y me han apoyado incondicionalmente.

A mi tutor, por su amabilidad y su compañía en esta etapa final de la carrera.

A mí misma, por lo duro que han sido estos años y que, pese a haberme influido en el ámbito académico, decidí seguir y acabar lo que empecé.

Hoy miro atrás y siento orgullo por cada paso que me llevó hasta aquí y por las personas que formaron parte de ello.

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado analiza la viabilidad técnica y económica de una aplicación móvil diseñada para mejorar la gestión de residuos en una Smart City, con el objetivo de promover su reducción y correcta segregación mediante el modelo de pago por generación (PxG). El proyecto se enmarca en el contexto normativo de la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados (Del Estado, 2022), y se centra en fomentar la participación ciudadana y optimizar el proceso de reciclaje a través de funcionalidades digitales.

La propuesta para el posible desarrollo de la aplicación elaboró utilizando la metodología ágil Scrum, con un enfoque iterativo y centrado en el usuario para asegurar su adaptación a las necesidades reales. El prototipo incluye herramientas para el registro digital de residuos, notificaciones personalizadas y un sistema de incentivos diseñado para motivar a los usuarios a adoptar hábitos responsables.

Los resultados muestran que la solución es técnicamente viable y económicamente sostenible, con potencial para contribuir a la economía circular y mejorar la sostenibilidad en entornos urbanos.

Palabras clave: gestión de residuos, Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados, economía circular, viabilidad técnica y económica, PxG, Scrum, aplicación móvil.

ABSTRACT

This bachelor's thesis analyzes the technical and economic feasibility of a mobile application designed to improve waste management in a Smart City, aiming to promote waste reduction and proper segregation through the PAYT (Pay As You Throw) model. The project is framed within the regulatory context of Law 7/2022 on waste and contaminated soils (Del Estado, 2022) and focuses on encouraging citizen participation and optimizing the recycling process through digital functionalities.

The proposed plan for the potential development of the application was designed using the agile Scrum methodology, with an iterative and user-centered approach to ensure adaptation to real needs. The prototype includes tools for digital waste tracking, personalized notifications, and an incentive system aimed at motivating users to adopt responsible habits.

The results show that the solution is technically feasible and economically sustainable, with potential to contribute to the circular economy and improve sustainability in urban environments.

Keywords: Smart City, waste management, Law 7/2022 on waste and contaminated soils and focuses on encouraging citizen participation and optimizing the recycling process through digital functionalities, technically feasible and economically sustainable, PAYT, Scrum, a mobile application

ÍNDICE DEL DOCUMENTO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
1. OBJETO Y ALCANCE.....	11
2 INTRODUCCIÓN.....	13
2.1 ANTECEDENTES.....	13
2.2. RESUMEN EJECUTIVO.....	15
3 MARCO TEÓRICO.....	16
MÓDULO NORMATIVA.....	16
3.1. CIUDADES INTELIGENTES.....	16
3.1 FUNDAMENTO NORMATIVO LEY 7/2022 Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA.....	16
3.2 PROBLEMÁTICAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TASA DE RESIDUOS.....	18
3.2.1 DESIGUALDAD ENRE MUNICIPIOS.....	19
3.2.2 TENSIONES.....	19
3.2.3 RECAUDACIÓN VS SOSTENIBILIDAD.....	20
3.2.4 INSEGURIDAD JURÍDICA Y NECESIDAD DE REFORMA.....	20
3.3 CASOS INTERNACIONALES SOBRE LA APLICACIÓN DEL MODELO “PAGO POR GENERACIÓN”.....	21
3.4.1 SUECIA.....	21
3.4.2 PAISES BAJOS.....	22
3.4.3 ALEMANIA.....	23
3.4.4 BÉLGICA (FLANDES).....	24
3.4.5 ESTADOS UNIDOS.....	25
3.4.6 JAPÓN.....	26
3.4.7 COREA DEL SUR.....	27
MÓDULO METODOLOGÍA.....	28
3.4 METODOLOGÍAS TRADICIONALES VS ÁGILES.....	28
3.5 METODOLOGÍAS ÁGILES.....	30
3.5.1 SCRUM.....	31
4 APLICACIÓN PRÁCTICA.....	34
4.1 DISEÑO DE LAS FUNCIONALIDADES DE LA APP MÓVIL.....	35
4.1.1 COMPARACIÓN CON MODELOS INTERNACIONALES.....	38
4.1.2 COMPARACIÓN CON RECICLOS DE ECOEMBES.....	44
4.1.3 EJEMPLO PRÁCTICO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA APP: USUARIO.....	48
4.2 PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN USANDO LA METODOLOGÍA SCRUM.....	49
5 ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICA.....	59
5.1 FUNDAMENTACIÓN EN EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EXISTENTES.....	60

5.2	VALIDACIÓN TÉCNICA DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	61
5.3	CUMPLIMIENTO NORMATIVO	62
6	ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA	64
6.1	BENEFICIOS DE LA DIGITALIZACIÓN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES	65
6.2	POSIBLES FUENTES DE FINANCIACIÓN	66
6.3	ANÁLISIS VAR Y TIR	67
7	CONCLUSIÓN DEL PROYECTO	80
7.1	RESULTADOS PRINCIPALES	80
7.2	LÍNEAS FUTURAS	82
8	REFERENCIAS	85
	ANEXO I: Diagramas de flujo de la aplicación	87

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA 1. FUNCIONAMIENTO DEL MODELO ÁGIL SCRUM</i>	<i>34</i>
<i>FIGURA 2. ECUACIÓN ECONOMÉTRICA DE LOS PAÍSES BAJOS.....</i>	<i>42</i>
<i>FIGURA 3. DIAGRAMA GANT DE LA PROPUESTA</i>	<i>59</i>
<i>FIGURA 4. COMPARACIÓN DEL VAN POR ESCENARIOS</i>	<i>75</i>
<i>FIGURA 5. EXCEL DEL CALCULO DEL TIR</i>	<i>77</i>
<i>FIGURA 6. COMPARATIVA TIR POR ESCENARIOS.....</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 7. DIAGRAMA INTERNO DE LA APLICACIÓN.....</i>	<i>90</i>
<i>FIGURA 8. DIAGRAMA EXTERNO DE LA APLICACIÓN.....</i>	<i>99</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>TABLA 1. COMPARACIÓN METODOLOGÍA TRADICIONAL VS ÁGILES</i>	29
<i>TABLA 2. METODOLOGÍAS ÁGILES</i>	30
<i>TABLA 3. COMPARATIVA FUNCIONAL ENTRE MODELOS INTERNACIONALES DE GESTIÓN DE RESIDUOS</i>	39
<i>TABLA 4. FUNCIONALIDADES FINALES DE LA PROPUESTA</i>	40
<i>TABLA 5. FUNCIONALIDADES FINALES DE LA PROPUESTA</i>	41
<i>TABLA 6. RECICLOS (ECOEMBES) VS APP DEL PROYECTO</i>	47
<i>TABLA 7. ROLES DE SCRUM PARA LA APP</i>	51
<i>TABLA 8. SPRINT FINALES</i>	53
<i>TABLA 9. COSTES DEL PERSONAL</i>	68
<i>TABLA 10. ESCENARIO OPTIMISTA CASH FLOW</i>	69
<i>TABLA 11. ESCENARIO NORMAL CASH FLOW</i>	71
<i>TABLA 12. ESCENARIO PESIMISTA CASH FLOW</i>	73
<i>TABLA 13. VAN TODOS LOS ESCENARIOS</i>	74
<i>TABLA 14. TIR DE TODOS LOS ESCENARIOS</i>	77
<i>TABLA 15. PAYBACK</i>	79
<i>TABLA 16. CONCLUSIÓN ESTUDIO TÉCNICO</i>	80
<i>TABLA 17. CONCLUSIÓN ESTUDIO ECONÓMICO</i>	81
<i>TABLA 18. POSIBLES LÍNEAS FUTURAS</i>	83

Lista de acrónimos

PAYT

“Pay as you throw”

PXG

Pago por generación

ERP

Responsabilidad del productor

IA

Inteligencia artificial

IoT

Internet de las cosas

1. OBJETO Y ALCANCE

OBJETO

El objetivo principal de este proyecto académico es evaluar la viabilidad técnica y económica de una aplicación móvil orientada a la gestión de residuos sólidos urbanos en el contexto de una Smart City. Dicha aplicación implementa el modelo PAYT (Pay As You Throw, “paga por lo que contaminas”) conforme a la legislación vigente, en particular la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados (Del Estado, 2022), con el objetivo de fomentar la reducción, correcta segregación y trazabilidad de los residuos generados por la ciudadanía.

ALCANCE

Este trabajo aborda los aspectos claves para el análisis y evaluación de una aplicación móvil diseñada para la gestión de residuos en el contexto de una Smart City. En primer lugar, se realiza un estudio exhaustivo del marco normativo vigente, tanto a nivel nacional como europeo, con especial atención a la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022), que regula la gestión y valorización de residuos y suelos contaminados.

Asimismo, se realiza una comparación con otras aplicaciones internacionales similares, permitiendo detectar buenas prácticas y oportunidades de mejora que enriquecen la propuesta evaluada.

A partir de este análisis, se selecciona y justifica la metodología ágil Scrum como el enfoque más adecuado para estructurar y gestionar la propuesta de desarrollo del proyecto, facilitando una organización eficiente mediante la definición de sprints y roles específicos.

Para complementar este estudio, se elaboran diagramas ASME que representan tanto los procesos internos de la propuesta de diseño de la aplicación como las interacciones externas desde la perspectiva del usuario, lo que contribuye a una comprensión clara y detallada del funcionamiento del sistema.

Finalmente, el proyecto incluye un análisis de viabilidad técnica y económica, utilizando herramientas financieras como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para evaluar, de manera práctica, la factibilidad y sostenibilidad del proyecto.

Es importante señalar que este Trabajo de Fin de Grado no contempla el desarrollo ni la implementación práctica de la aplicación móvil.

2 INTRODUCCIÓN

2.1 ANTECEDENTES

La digitalización progresiva de los servicios urbanos ha convertido la gestión eficiente de los residuos en un objetivo central de las estrategias medioambientales, especialmente en el marco de las denominadas Smart Cities. Debido a esto, la investigación se orienta a examinar si resulta factible, desde un punto de vista técnico y económico, desarrollar una aplicación móvil capaz de mejorar la recogida, seguimiento y tratamiento de los desechos urbanos.

El núcleo del análisis se relaciona con el modelo de pago por generación (PxG o PAYT), planteado en la Ley 7/2022, de 8 de abril, sobre residuos y suelos contaminados para una economía circular (Del Estado, 2022). Esta legislación, alineada con las metas fijadas por la Unión Europea —en especial la Directiva (UE) 2018/851 (Directiva (UE) 2018/ 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, s. f.)—, busca reducir de forma significativa la producción de residuos, al tiempo que impulsa la transición hacia un sistema de economía circular.

Una de las novedades más relevantes introducidas por la norma es la obligación de establecer unas tasas ajustadas al principio “quien contamina paga” (PAYT/PxG). Mediante este mecanismo, el importe que cada usuario debe abonar se calcularía directamente en función de los residuos que genere. Cabe destacar que no solo se pretende cubrir los gastos del servicio, sino también promover hábitos de consumo responsables, minimizar la cantidad de desechos y fomentar de manera activa las prácticas de reutilización y reciclaje (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Numerosos estudios respaldan la eficacia del modelo PxG como catalizador del cambio conductual. Así, (Romano & Masserini, 2023) han documentado cómo este tipo de tasas incentivan la segregación inicial de residuos y disminuyen considerablemente la cantidad de desechos no reciclables. Esta evidencia resulta particularmente relevante en el

contexto español, donde aún persisten tasas de reciclaje por debajo de los objetivos comunitarios.

No obstante, en España la implementación del PxG no está exenta de obstáculos, sobre todo en municipios de tamaño medio o pequeño. A los desafíos tecnológicos y financieros se suma la exigencia legal de que la tasa sea no deficitaria, es decir, que los ingresos cubran de forma íntegra el coste del servicio. La falta de infraestructuras, la inestabilidad de los mercados de materiales reciclables y las limitaciones normativas locales suponen barreras significativas para su despliegue.

Frente a este escenario, resulta imprescindible analizar experiencias internacionales que puedan servir como referencia. Modelos implantados en países como Alemania, Países Bajos, Suiza, Bélgica o Italia han alcanzado reducciones significativas en la generación de residuos y mejoras en la eficiencia económica de sus sistemas gracias a modelos que integran tecnología digital, cobro por peso o volumen, incentivos económicos y políticas de obligatoriedad. A su vez, experiencias fuera de Europa, como las de Corea del Sur, Japón o San Francisco, aportan un enfoque centrado en la innovación tecnológica, la trazabilidad y la educación ciudadana (Kirchherr et al., 2017).

En conjunto, estos ejemplos revelan que para aplicar con éxito el sistema PxG es necesario contar con herramientas que permitan una gestión precisa, transparente y accesible de los residuos. En este sentido, una aplicación móvil puede facilitar la interacción entre ciudadanos y administraciones, facilitando tanto la trazabilidad y el control legal de los residuos como una comunicación fluida. No se trata solo de acatar con la legislación vigente, se busca fomentar un cambio en la relación de los ciudadanos con sus residuos, facilitando decisiones más sostenibles y conscientes.

Por este motivo, este proyecto surge como respuesta a los retos que plantea la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Del Estado, 2022) la cuál introduce exigencias normativas en materia de prevención, recogida separada, digitalización del control de residuos y participación social. En este contexto, se plantea una herramienta tecnológica, una aplicación móvil que actúe como nexo entre la administración pública y los ciudadanos, facilitando el cumplimiento de los requisitos legales, reduciendo costes operativos y promoviendo prácticas sostenibles.

La presente aplicación corresponde a un proyecto proporcionado por una empresa del sector tecnológico, que ha cedido el diseño conceptual inicial para su futura implementación. Dado que aún no ha sido comercializada, el desarrollo se encuentra en una fase preliminar.

2.2. RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio analiza la viabilidad técnica y económica de una aplicación móvil destinada a la gestión de residuos en una Smart City, diseñada para mejorar la sostenibilidad urbana y cumplir con la normativa vigente.

Se realizó un estudio normativo para asegurar el cumplimiento legal, y se desarrollaron diagramas de flujo tipo ASME que describen las funcionalidades principales de la aplicación. Para la gestión de la propuesta para un futuro desarrollo, se aplicó la metodología Scrum, asegurando un proceso iterativo y eficiente.

El análisis técnico evaluó aspectos clave como la seguridad de datos, escalabilidad, integración con sistemas municipales y operatividad en entornos reales. Paralelamente, se calculó indicadores financieros claves, entre ellos, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), bajo diferentes escenarios de mercado, confirmando la rentabilidad del proyecto.

Los resultados evidencian que la aplicación es viable técnica y económicamente, aportando una alternativa eficiente y sostenible para optimizar la gestión inteligente de residuos urbanos.

3 MARCO TEÓRICO

MÓDULO NORMATIVA.

3.1. CIUDADES INTELIGENTES

Una ciudad inteligente es un enfoque de desarrollo urbano que utiliza la tecnología y la innovación para optimizar la vida cotidiana de sus ciudadanos. Este enfoque integra soluciones digitales, sistemas de monitoreo y trato de datos con el propósito de administrar de manera óptima los servicios públicos y los recursos esenciales, como el transporte, la energía o el abastecimiento del agua.

La Smart City no solo se centra en la infraestructura tecnológica, sino que también promueve la participación ciudadana, la transparencia y la sostenibilidad ambiental. En este sentido, autores como Boyd Cohen destacan que las ciudades inteligentes funcionan como ecosistemas dinámicos en los que la tecnología facilita la interacción y cooperación entre las administraciones públicas, la ciudadanía y el sector empresarial, fortaleciendo su capacidad para adaptarse y responder ante los desafíos propios del entorno urbano (Boyd Cohen, 2016).

En definitiva, la ciudad inteligente es un espacio urbano que, mediante el uso inteligente de la tecnología y la innovación, aspira a ser más inclusivo, sostenible y eficiente, respondiendo a las necesidades actuales y futuras de sus ciudadanos.

3.1 FUNDAMENTO NORMATIVO LEY 7/2022 Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA

La gestión de residuos constituye uno de los retos ambientales más relevantes tanto para España como para la Unión Europea, especialmente en el contexto de la transición hacia un modelo de desarrollo sostenible basado en los principios de la economía circular. En este marco, la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Del Estado, 2022a), supone un hito normativo que orienta la acción pública hacia la prevención, reducción y valorización de los residuos. Esta normativa actualiza y refuerza los

compromisos de la Directiva (UE) 2018/851, que modifica la Directiva 2008/98/CE del Parlamento y del Consejo, priorizando la prevención y el reciclaje como ejes centrales en la gestión eficiente de residuos. (Directiva (UE) 2018/ 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, s. f.)

Entre las metas fundamentales de la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022a) se encuentra la disminución en la generación de residuos y la promoción de una gestión más eficiente, capaz de reducir la presión sobre los recursos naturales y minimizar el impacto ambiental. Para alcanzar estos fines, incorpora herramientas como el sistema de pago por generación (PxG), también denominado por sus siglas en inglés PAYT (pay-as-you-throw). Este esquema busca incentivar prácticas responsables tanto en la ciudadanía como en el ámbito empresarial, bajo el principio de quien produce residuos debe cubrir los costes asociados a su tratamiento. (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025)

El sistema PxG se apoya en el principio de extra-fiscalidad ambiental, que consiste en utilizar la tributación como herramienta para influir en las conductas y corregir externalidades negativas. De este modo, la tasa no se limita a una función recaudatoria, sino que se configura como un instrumento transformador, destinada a reducir la generación de residuos y a incrementar la sostenibilidad de su gestión. (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

En el ámbito internacional, diversos estudios respaldan la eficacia del PAYT en la promoción de modelos más sostenibles para la gestión de residuos urbanos. Por ejemplo, la experiencia de varios países europeos demuestra que su aplicación ha derivado en una disminución notable de la cantidad total de residuos y en una mejora significativa de la recogida selectiva (Romano & Masserini, 2023).

A pesar de sus ventajas, la aplicación práctica de la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022a) enfrenta importantes retos técnicos, sociales y económicos que es necesario abordar para asegurar una transición justa y efectiva hacia la economía circular (Kirchherr et al., 2017; Puig Ventosa, s. f.) Este análisis adquiere especial relevancia en el ámbito municipal, dado que la mayor parte de la gestión directa de residuos recae en los municipios, donde las capacidades técnicas y financieras varían considerablemente.

En definitiva, la ley constituye la base normativa fundamental de la política de gestión de residuos en España, adaptando las directrices europeas al contexto nacional y promoviendo prácticas como la recogida separada, el reciclaje eficiente y la aplicación del principio de responsabilidad ampliada del productor, aspectos esenciales para transitar hacia un modelo de economía más circular y sostenible (Del Estado, 2022).

3.2 PROBLEMÁTICAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TASA DE RESIDUOS

La Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Del Estado, 2022a) introdujo una figura tributaria con importantes implicaciones técnicas y financieras para los municipios: la tasa municipal de residuos bajo el principio de "pago por generación" (PxG). Aunque esta innovación busca promover la corresponsabilidad y avanzar en la jerarquía de residuos, su aplicación ha revelado profundas limitaciones estructurales y normativas en el ámbito local.

Una de las principales tensiones en la implementación efectiva de esta tasa radica en la persistencia de sistemas tarifarios fijos en casi la mitad de los municipios, lo cual distorsiona el principio de equidad ambiental que subyace al PxG. Esta situación compromete la efectividad del instrumento como herramienta de incentivo en la reducción de residuos y el incremento de las prácticas de reciclaje. (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Asimismo, los autores destacan tres núcleos de problemática: en primer lugar, la marcada asimetría en la capacidad técnica y económica entre municipios, que impide una implementación homogénea del PxG; en segundo lugar, las incongruencias normativas entre la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022a) y el marco jurídico-financiero local; y, finalmente, la tensión entre los fines ambientales de la tasa y su diseño como instrumento puramente recaudatorio.

3.2.1 DESIGUALDAD ENRE MUNICIPIOS

Los municipios más pequeños, que representan una gran parte del territorio español, enfrentan serias dificultades a la hora de ajustarse a las exigencias operativas establecida en la ley debido a su limitada capacidad técnica y presupuestaria. La gestión individualizada de residuos exige herramientas tecnológicas y sistemas logísticos que muchos ayuntamientos no pueden costear sin apoyo externo. Diversos estudios subrayan que esta disparidad amenaza los principios de igualdad y cohesión territorial, al generar una aplicación fragmentada de la normativa (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Además, la falta de coordinación interadministrativa y la disparidad autonómica en competencias agravan esta situación. El propio informe de la Comisión Europea (como se citó en Fragoso-Martínez y Rivera-Fernández, 2025) identifica que las diferencias en los modelos de gestión regional constituyen un freno a la armonización y eficiencia del sistema a escala nacional.

En esta línea, varios autores (Dahlén & Lagerkvist, 2010) han demostrado que la implantación del pago por generación en contextos sin infraestructura de seguimiento adecuada tiende a ser ineficaz o incluso contraproducente.

3.2.2 TENSIONES

Otro de los puntos críticos es la falta de coherencia entre el principio de recuperación íntegra de costes contemplados en la Ley 7/2022 y la limitación de la Ley Reguladora de las Haciendas Locales, la cual prohíbe que las tasas excedan el coste del servicio. Como detallan (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025) esta contradicción genera una inseguridad jurídica considerable, especialmente cuando los municipios aplican bonificaciones para incentivar comportamientos responsables o garantizar la equidad social. Estos incentivos, aunque deseables, reducen los ingresos sin posibilidad de cobertura financiera adicional.

La interpretación del Tribunal Supremo ha intensificado el problema, al insistir en que el principio de equivalencia debe respetarse de forma rigurosa en el cálculo de las tasas (STS 818/2024, como se citó en (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025)). Así, los

municipios deben ajustar sus tarifas con una precisión contable difícil de lograr, especialmente en contextos de alta volatilidad de costes. El asunto ha suscitado discusión entre especialistas (José et al., s. f.) quienes advierten que la rigidez legal obstaculiza la capacidad de los ayuntamientos para introducir medidas equitativas.

3.2.3 RECAUDACIÓN VS SOSTENIBILIDAD.

La tensión entre el objetivo ambiental y el diseño recaudatorio de la tasa es una de las paradojas centrales identificadas por los autores. Mientras la ley aspira a reducir residuos y fomentar el reciclaje, el instrumento fiscal ha sido estructurado principalmente para financiar el coste del servicio. Esta disonancia conceptual limita su utilidad como incentivo ambiental (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Además, la rigidez del sistema impide generar excedentes para inversiones en educación ambiental, innovación o mejora del servicio. Los autores concluyen que una solución a este conflicto requeriría una reforma más profunda del marco de financiación local, incorporando principios de flexibilidad y sostenibilidad económica. En este sentido, (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025; Romano & Masserini, 2023) argumentan que el éxito de los sistemas de PxG en Europa depende no solo del diseño fiscal, sino también de su integración con políticas ambientales coherentes y sostenidas.

3.2.4 INSEGURIDAD JURÍDICA Y NECESIDAD DE REFORMA.

Finalmente, la interpretación del principio de "no déficit" genera un intenso debate doctrinal. Aunque el Ministerio de Hacienda ha defendido una lectura flexible del artículo 11.3 de la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022a), diversos expertos —como Patón García y Puig Ventosa 2024, como se citó en (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025))— advierten que esta interpretación puede desvirtuar la exigencia legal y generar inseguridad en los municipios.

En consecuencia, los autores abogan por una reforma legislativa que armonice las exigencias financieras con la finalidad ambiental del tributo, ofreciendo a los entes locales mayor seguridad jurídica y margen operativo.

3.3 CASOS INTERNACIONALES SOBRE LA APLICACIÓN DEL MODELO “PAGO POR GENERACIÓN”

El análisis de experiencias en países extranjeros ofrece una base valiosa para comprender tanto los desafíos como las oportunidades del sistema de “pago por generación” (PxG) que contempla la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022a). Diversos países europeos han desarrollado modelos de tarifarios que ajustan el importe a pagar según la cantidad real de residuos generados, lo que ha demostrado ser una herramienta eficaz para fomentar la reducción en origen y mejorar los niveles de reciclaje.

En el contexto europeo, este método se ha consolidado gracias a soluciones como la recogida domiciliar selectiva y el empleo de contenedores con sistemas inteligentes. En España, sin embargo, este enfoque se encuentra en una fase muy incipiente, con una implantación inferior al 1 % de los municipios, lo cual refleja la necesidad de un impulso institucional y técnico más decidido (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Uno de los elementos centrales identificados es el diseño de la estructura tarifaria. Se defiende que el éxito del sistema depende de una combinación adecuada entre una cuota fija (para cubrir los costes estructurales del servicio) y una cuota variable (vinculada directamente al volumen o peso de residuos no reciclables), que actúe como incentivo económico para los hogares (José & García, s. f.)

3.4.1 SUECIA

El caso sueco se perfila como uno de los ejemplos más avanzados en la aplicación del modelo PxG. Según los datos recopilados por (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025) en Suecia se ha implantado un sistema de cobro basado en el peso de los residuos,

mediante la utilización de contenedores inteligentes y tecnología de pesaje automático instalada en los vehículos de recogida. Esta infraestructura ha permitido alcanzar tasas de valorización cercanas al 100 %, reduciendo al mínimo el vertido de residuos domésticos.

El modelo sueco combina eficacia técnica con un fuerte componente de educación ciudadana, ya que el éxito del sistema depende no solo de la tecnología implementada, sino también del compromiso activo de la población en la separación y el compostaje. A ello se suma una política sostenida de información ambiental que refuerza la corresponsabilidad y la conciencia ecológica de los usuarios (Dahlén & Lagerkvist, 2010)

Los autores también señalan que, aunque la adopción de este sistema en España implicaría importantes desafíos financieros —especialmente en los municipios de menor tamaño—, la disponibilidad de fondos europeos como los Next Generation EU o los programas FEDER podría facilitar la incorporación de tecnologías avanzadas y promover un modelo más eficiente, equitativo y ambientalmente sostenible (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025; Puig Ventosa, s. f.).

En conjunto, el caso sueco muestra que la incorporación de tecnologías de medición precisas, junto a campañas de sensibilización y esquemas tarifarios justos, puede generar resultados notables en términos de eficiencia, reciclaje y aceptación ciudadana.

3.4.2 PAISES BAJOS

En los Países Bajos, el modelo de pago por generación (PxG) se fundamenta en la facturación basada en el volumen de residuos generados, estableciendo tarifas que varían según la cantidad de basura no reciclable que se produce. Los usuarios pueden seleccionar entre diferentes tamaños de contenedores, lo cual les permite ajustar sus costes de acuerdo con sus hábitos de consumo y generación de residuos. Esta estrategia incentiva la reducción de desechos y promueve una mayor implicación en programas gratuitos de reciclaje y compostaje (Dijkgraaf & Gradus, 2004).

El sistema neerlandés incluye la obligatoriedad de separar residuos reciclables, tales como plástico, vidrio, papel y metales, los cuales suelen recogerse sin coste o a un precio muy bajo en la mayoría de los municipios. Este diseño facilita una amplia participación

ciudadana en la separación en origen, contribuyendo a la sostenibilidad y eficacia del sistema.

Además, en territorios rurales o municipios con menor población, los Países Bajos han desarrollado mecanismos de colaboración intermunicipal para compartir infraestructuras y servicios —como plantas de reciclaje y centros de tratamiento—, optimizando recursos y reduciendo los costes.

Para España, este modelo ofrece importantes enseñanzas:

- La combinación de cuotas fija y variable permite financiar el servicio de manera sostenible y promover la reducción de residuos.
- Los sistemas de PxG, ya sea por peso o recogida puerta a puerta, resultan efectivos para mejorar la separación.
- La colaboración intermunicipal y la financiación europea son claves para extender estos modelos, especialmente en áreas con limitaciones técnicas o económicas.
- Adaptar las tarifas a las características locales permite responder mejor a los desafíos específicos de cada territorio.

3.4.3 ALEMANIA

El sistema alemán de gestión de residuos se distingue por su eficacia y adaptabilidad, combinando una estructura tarifaria que considera tanto el volumen de residuos como la frecuencia de recogida. Este modelo promueve la reducción de desechos no reciclables mediante incentivos económicos y fomenta una colaboración estrecha entre municipios, especialmente en zonas rurales (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Los residentes pueden seleccionar contenedores de diferentes tamaños y ajustar la periodicidad de la recolección, lo que les permite controlar sus gastos y estimular prácticas responsables en la gestión de residuos. Los materiales reciclables —como vidrio, papel, plástico y metales— se recogen de forma gratuita o a bajo costo, incentivando su correcta separación. Además, el sistema incluye recogida específica para residuos orgánicos, generalmente con tarifas reducidas o sin coste, facilitando el compostaje doméstico.

La cooperación intermunicipal es fundamental para garantizar servicios eficientes y económicos, permitiendo el uso compartido de infraestructuras como plantas de reciclaje y centros de compostaje en municipios con recursos limitados.

Asimismo, Alemania cuenta con un sistema de depósito para envases (Pfand), que exige un pequeño pago adicional al comprar botellas y latas, reembolsable al devolver los envases. Este mecanismo ha alcanzado tasas de devolución superiores al 90 %, contribuyendo significativamente a la reducción de residuos sólidos.

Experiencias locales muestran que este sistema permite a las familias gestionar mejor sus costes y residuos, y que la colaboración entre municipios resulta clave para optimizar la eficiencia.

En el contexto español, la adopción de un modelo similar podría contemplar:

- Tarifas variables basadas en volumen y frecuencia para incentivar la reducción de residuos.
- Fortalecimiento de la colaboración intermunicipal para aprovechar recursos compartidos.
- Implantación de un sistema de depósito para envases que fomente su retorno.
- Programas de sensibilización y mecanismos sancionadores para garantizar el cumplimiento ciudadano.

3.4.4 BÉLGICA (FLANDES)

En Flandes, el sistema de gestión de residuos se caracteriza por tarifas diferenciadas según el tipo y volumen de residuos, complementado con ayudas económicas que incentivan a la ciudadanía a participar en la separación y el reciclaje. Gracias a esta estrategia, la región ha logrado alcanzar una tasa de reciclaje superior al 70 %, consolidándose como un referente europeo en economía circular (Batllell & Hanf, 2008; Frago-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

El sistema penaliza económicamente a quienes generan residuos no reciclables, mientras que la recolección de materiales reciclables y compostables se ofrece sin coste o a un precio reducido, incentivando su adecuada gestión desde el origen.

Adicionalmente, se fomentan prácticas sostenibles mediante subsidios para la adquisición de compostadores domésticos, reduciendo el volumen de residuos orgánicos enviados a las infraestructuras municipales.

La responsabilidad ampliada del productor (EPR) es otro pilar fundamental, que obliga a los fabricantes a asumir parte de los gastos vinculados a la recogida y el reciclaje, lo cual reduce la carga financiera municipal y promueve la economía circular.

Por último, la colaboración entre entidades públicas y privadas ha sido decisiva para desarrollar infraestructuras modernas y mejorar la eficiencia del sistema, permitiendo además optimizar los costes operativos.

Las lecciones que este modelo ofrece para España incluyen:

- Implementar tarifas diferenciadas que fomenten la separación y reduzcan residuos no reciclables.
- Promover subsidios que faciliten el compostaje domiciliario y prácticas sostenibles.
- Reforzar la responsabilidad del productor como vía de financiación de la gestión de residuos.
- Impulsar la cooperación público-privada para optimizar recursos e infraestructuras.

3.4.5 ESTADOS UNIDOS

San Francisco es uno de los casos más destacados de Estados Unidos en la aplicación del sistema PxG, integrado con políticas rigurosas de reciclaje y compostaje, logrando así resultados sobresalientes. La ciudad ha conseguido desviar más del 80 % de sus residuos

sólidos de los vertederos mediante un esquema normativo y económico que combina tarifas diferenciadas, obligatoriedad en la separación y un acceso amplio a programas de reciclaje y compostaje (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025)

Los habitantes únicamente pagan por la cantidad de residuos no reciclables que producen, mientras que el reciclaje y el compostaje son servicios gratuitos o subvencionados, lo cual fomenta la segregación en origen (Bel & Gradus, 2016). Además, las normativas municipales exigen que hogares y negocios separen correctamente los residuos reciclables y orgánicos; el incumplimiento puede acarrear sanciones económicas, fortaleciendo así el cumplimiento ciudadano.

El modelo se complementa con campañas constantes de educación ambiental y sensibilización, que han favorecido un cambio cultural hacia hábitos más responsables y sostenibles. La infraestructura avanzada permite un procesamiento eficiente de los residuos segregados a gran escala.

Este enfoque integral ha convertido a San Francisco en un referente internacional en sostenibilidad urbana. Para España, la adopción gradual de un sistema similar podría incluir tarifas diferenciadas, obligatoriedad en la separación, sanciones, educación ambiental y el desarrollo de infraestructuras adecuadas, comenzando por municipios con capacidades tecnológicas suficientes (Puig Ventosa, s. f.).

3.4.6 JAPÓN

Japón es reconocido globalmente por su sistema detallado de separación de residuos y un esquema tarifario que varía en función del tipo y volumen de desechos generados. Gracias a esta estrategia, muchas regiones alcanzan tasas de reciclaje que superan el 80 %, logrando una reducción significativa de residuos enviados a vertederos o incineradoras (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

Los ciudadanos deben clasificar los residuos en múltiples categorías específicas, incluyendo papel, plásticos, metales, vidrio y residuos orgánicos, entre otros. Cada municipio establece normas y calendarios adaptados para la recolección, asegurando una gestión adecuada y localizada.

Las tarifas se aplican según la cantidad y el tipo de residuo, con costes más altos para los residuos no reciclables y la exención o reducción para materiales reciclables y orgánicos. Además, el sistema enfatiza la corresponsabilidad de ciudadanos, empresas y autoridades públicas, incorporando políticas de responsabilidad ampliada del productor. Este enfoque obliga a los fabricantes a asumir los costes vinculados al reciclaje de los productos que ponen en el mercado.

Las campañas de educación ambiental son intensas y constantes, garantizando que la población comprenda las normas y participe activamente. La falta de cumplimiento puede conllevar sanciones económicas y la suspensión de la recolección.

Este modelo ha conseguido un alto grado de recuperación de materiales reciclables y un compromiso social significativo. Para España, adoptar un sistema similar implicaría implementar una separación más detallada, tarifas diferenciadas, reforzar la responsabilidad del productor en sectores clave y promover campañas educativas que aseguren la participación y cumplimiento ciudadanos.

3.4.7 COREA DEL SUR

Se posiciona como un caso ejemplar de éxito en la implementación de un sistema PxG, destacando por su uso de tecnologías avanzadas, políticas inclusivas y fuertes incentivos económicos. Desde la instauración del sistema en 1995, el país ha logrado reducir significativamente los residuos no reciclables, mientras que las tasas de reciclaje han aumentado notablemente (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025).

El pago por generación se materializa mediante bolsas de basura prepagadas, que incorporan el coste de tratamiento y disposición final, garantizando que quienes generan más residuos no reciclables paguen en proporción a su producción. Además, en determinadas zonas se emplean contenedores inteligentes que registran automáticamente el volumen de residuos depositados, aplicando tarifas precisas y transparentes (Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025; Puig Ventosa, s. f.)

Los residuos reciclables y orgánicos son recogidos gratuitamente, incentivando su correcta separación desde el origen. El sistema se apoya en un respaldo técnico y financiero

fuerte del gobierno central, que facilita la implementación homogénea en todo el territorio, incluyendo zonas con menos recursos.

Este modelo ha logrado tasas de reciclaje superiores al 60 % , reduciendo de manera significativa la cantidad de desechos que terminan en vertederos o incineradoras. En el caso de España, la replicación del sistema coreano requeriría la introducción de bolsas prepagadas, la posible incorporación de contenedores inteligentes, la gratuidad en la recogida de materiales reciclables y orgánicos, así como un sólido apoyo financiero y técnico a nivel estatal y regional

MÓDULO METODOLOGÍA.

3.4 METODOLOGÍAS TRADICIONALES VS ÁGILES

En el área del desarrollo software, existen tanto metodologías tradicionales como métodos ágiles, cada uno con características y enfoques diferenciados que influyen en la gestión, ejecución y resultados de los proyectos. A continuación, se expone una comparación sintetizada basada en diversos estudios y fuentes académicas (Cadavid et al., s. f.; Khurana, s. f.; López Gil, 2018)

Características	Metodologías Tradicionales	Metodologías Ágiles
Enfoque general	Predictivo, planificación fija y detallada	Adaptativo, flexible y orientado al cambio
Orientación	Procesos y fases definidas	Personas y colaboración continua
Estructura del proceso	Rígida y secuencial	Flexible, iterativa y con entregas incrementales
División del proyecto	Proyecto concebido como un todo	Proyecto subdividido en múltiples entregas pequeñas

Comunicación con el cliente	Limitada, generalmente al inicio y al final	Comunicación constante y activa durante todo el proceso
Entrega de software	Única, al finalizar el proyecto	Entregas frecuentes y continuas
Documentación	Extensa y detallada	Mínima, enfocada en lo esencial

TABLA 1. COMPARACIÓN METODOLOGÍA TRADICIONAL VS ÁGILES

(Fuente: elaboración propia basada en Cadavid et al., s. f.; Khurana, s. f.; López Gil, 2018)

La selección de una metodología de desarrollo debe ajustarse al tipo de proyecto, su complejidad y el grado de incertidumbre del entorno en el que se lleva a cabo. En los métodos tradicionales, como el de cascadas, se emplea, una estructura rígida y secuencial donde los requerimientos deben definirse en su totalidad desde el principio. Este enfoque puede funcionar de manera eficaz cuando el entorno es estable y las necesidades del proyecto no están sujetas a modificaciones significativas (Schwaber & Sutherland, 2020).

Sin embargo, en iniciativas sujetas a cambios normativos, avances tecnológicos o demandas sociales variables, tal como ocurre en el desarrollo de aplicaciones para ciudades inteligentes, esta rigidez puede convertirse en un obstáculo. Frente a ello, las metodologías ágiles han demostrado una mayor capacidad de adaptación al permitir una construcción progresiva del producto, favoreciendo la colaboración continua entre los equipos y los usuarios (Cadavid et al., s. f.).

En situaciones como la creación de una aplicación para la administración de residuos urbanos, donde intervienen distintos actores (ciudadanía, administraciones públicas, empresas de gestión) y donde las condiciones pueden modificarse con rapidez, los métodos ágiles permiten reaccionar ante lo inesperado y ofrecer mejoras constantes. Su enfoque iterativo, centrado en entregas parciales, comunicación fluida y validación frecuente de avances, resulta especialmente útil para alinear el producto con las necesidades reales del entorno (Cadavid et al., s. f.; López Gil, 2018).

Desde esta perspectiva, el uso de metodologías ágiles no solo se ajusta a los requisitos técnicos del proyecto, sino que también aporta valor en términos de eficiencia, escalabilidad y orientación al usuario final, elementos clave en las iniciativas digitales desarrolladas para entornos urbanos inteligentes.

3.5 METODOLOGÍAS ÁGILES

Para analizar qué metodología ágil sería la más adecuada para nuestra aplicación, se ha optado por hacer una comparación de cuatro de ellas para ver cuál sería la más adecuada para este proyecto.

XP(Extreme Programming)	SCRUM	KANBAN	DSDM(Dynamic Systems Development Method)
<p>Resulta especialmente adecuada para entornos de alta incertidumbre, ya que prioriza la entrega veloz y continua de funcionalidades, manteniendo un estándar elevado en la calidad del código. Su estructura promueve mejoras constantes y una fuerte orientación hacia las necesidades del usuario final, adaptándose ágilmente a los cambios.</p>	<p>Sobresale por su estructura iterativa, centrada en la mejora progresiva del producto. Permite una colaboración fluida entre los distintos perfiles del equipo, además de integrar al cliente durante todo el proceso, contribuyendo a una toma rápida de decisiones y la mejora continua del desarrollo.</p>	<p>Se caracteriza por su habilidad para ajustarse a las prioridades cambiantes, facilitando la gestión visual del flujo de trabajo. Además fomenta la autonomía del equipo y asegura una entrega constante de valor, lo cual la convierte en una herramienta eficaz en proyectos que requieren ajustes constantes y comunicación activa.</p>	<p>Está orientada a resultados desde etapas tempranas del desarrollo. Su enfoque combina agilidad y control, permitiendo incorporar modificaciones a partir del feedback recibido, lo que favorece una colaboración constante con los usuarios y respuestas rápidas ante nuevas necesidades.</p>

TABLA 2. METODOLOGÍAS ÁGILES

(Fuente: elaboración propia basada en Jhanina
et al., 2024).

Debido a esta comparación, se ha decidido que Scrum sería una metodología óptima para la aplicación de gestión de residuos debido a su alta alineación con los objetivos y características que demanda el proyecto.

3.5.1 SCRUM

Es un método de trabajo ágil que se emplea diseñar, implementar y gestionar productos complejos, en particular en entornos donde los requerimientos cambian con rapidez. Su objetivo principal es generar valor de forma continua y adaptativa mediante ciclos de trabajo iterativos e incrementales conocidos como Sprints (Schwaber & Sutherland, 2020)

A diferencia de metodologías tradicionales, Scrum promueve la toma de decisiones fundamenta en la experiencia directa y la observación constante del proceso. Se sustenta en los principios del empirismo y el pensamiento Lean: el primero plantea que el conocimiento se obtiene mediante la práctica y la reflexión, mientras que el segundo busca eliminar el desperdicio y enfocarse en lo esencial para maximizar el valor entregado (Schwaber & Sutherland, 2020)

Fundamentos y Pilares de Scrum

El funcionamiento de Scrum gira en torno a tres pilares esenciales: transparencia, inspección y adaptación. La transparencia permite que todos los involucrados tengan visibilidad clara sobre el estado del trabajo; la inspección consiste en evaluar con regularidad el progreso y los resultados; y la adaptación implica ajustar procesos y objetivos en función de lo aprendido (Schwaber & Sutherland, 2020).

Estos pilares se apoyan en cinco valores esenciales que son el compromiso, el enfoque, la apertura, el respeto y el coraje, los cuales que orientan la conducta del equipo

creando un entorno de trabajo colaborativo y de mejora continua (Schwaber & Sutherland, 2020).

La Estructura del Equipo Scrum

Scrum define una estructura organizacional simple pero efectiva, compuesta por tres roles:

- **Product Owner:** se encarga de optimizar el valor del producto y administrar el Product Backlog, organizando los requerimientos y asegurando su claridad para el equipo.
- **Scrum Máster:** desempeña el rol de facilitador dentro del marco Scrum, apoyando al equipo a eliminar impedimentos, comprender los principios ágiles y mejorar su desempeño.
- **Desarrolladores:** son los encargados de transformar los requerimientos en incrementos funcionales durante cada Sprint. Este grupo es autoorganizado y multifuncional, lo que les permite asumir colectivamente la responsabilidad del resultado final (Schwaber & Sutherland, 2020).

Eventos en Scrum

El marco define cinco eventos que estructuran el trabajo y habilitan la inspección y adaptación constante:

1. **Sprint:** ciclo de trabajo de duración fija (hasta un mes), en el cual se crea un incremento usable y valiosos del producto.
2. **Sprint Planning:** evento inicial donde se establece el objetivo del Sprint y se seleccionan los elementos del Product Backlog que serán desarrollado.
3. **Daily Scrum:** reunión diaria de 15 minutos donde los desarrolladores revisan su progreso y ajustan su plan de trabajo.

4. **Sprint Review:** sesión al finalizar el Sprint para presentar el incremento y obtener retroalimentación de los interesados.

5. **Sprint Retrospective:** espacio para reflexionar sobre el proceso y definir acciones de mejora para el siguiente Sprint (Schwaber & Sutherland, 2020).

Artefactos de Scrum y sus Compromisos

Scrum utiliza tres artefactos que reflejan el trabajo y orientan el desarrollo hacia la entrega de valor:

- **Product Backlog:** lista dinámica y priorizada de todo lo necesario para el desarrollo del producto. Está asociado al Objetivo del Producto (Product Goal), que define un estado deseado futuro y guía la evolución del producto.
- **Sprint Backlog:** grupo de elementos seleccionados del Product Backlog para el Sprint en curso, acompañado de un plan para su ejecución. Su compromiso es Sprint Goal, que le da propósito al trabajo diario.
- **Incremento:** representa la acumulación de todos los elementos terminados durante el Sprint, los cuales deben cumplir con la llamada Definición de Hecho (Definition of Done), que garantiza calidad y funcionalidad (Schwaber & Sutherland, 2020).

Cada artefacto está diseñado para maximizar la transparencia y servir como base objetiva para tomar decisiones. En este sentido, la Definición de Hecho determina los estándares de calidad que un incremento debe alcanzar para ser considerado terminado. Si un ítem no cumple con ella, no puede liberarse ni presentarse durante la revisión del Sprint (Schwaber & Sutherland, 2020).

SCRUM

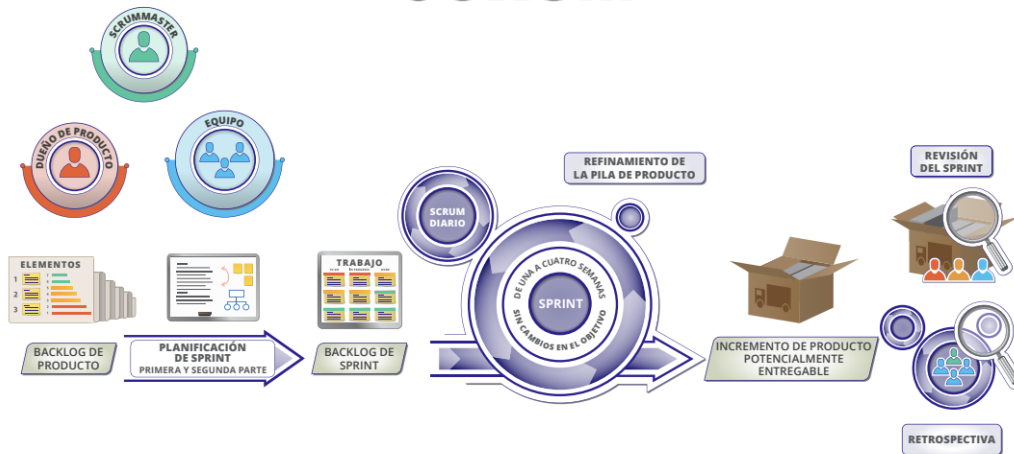


FIGURA 1. FUNCIONAMIENTO DEL MODELO ÁGIL SCRUM

(Fuente: Deemer et al., 2012)

4 APLICACIÓN PRÁCTICA

En este capítulo, se va a presentar el diseño de la aplicación y la propuesta del desarrollo de esta para una futura implementación en entornos reales. El propósito es ofrecer una herramienta que sirva como solución para la mejora de la gestión de los residuos en el contexto de una Smart City.

Tras el análisis normativo y metodológico abordado en capítulos anteriores, esta sección supone el paso de la teoría a la práctica, mostrando cómo los fundamentos estudiados se traducen en una solución tecnológica concreta. El objetivo de esta sección es mostrar cómo la aplicación puede materializar los principios estudiados, alineándose con la ley 7/2022, con el modelo de tarificación de pago por generación (PxG), fomentando la economía circular y participación ciudadana a través de un diseño funcional.

Para asegurar que la propuesta se ajusta a las mejores prácticas del sector, se va a realizar un análisis comparativo con otras experiencias internacionales desarrolladas en capítulos anteriores. Esta comparativa permite identificar las fortalezas y debilidades de las

soluciones existentes, así como validar los elementos diferenciales y el valor añadido de la solución planteada, para establecer unas funcionalidades finales y así realizar diagramas ASME tanto de la parte interna como de la externa de la aplicación con el fin de visualizar la propuesta final del diseño.

Una vez que se han planteado las funcionalidades finales, se va a empezar a plantear la propuesta del desarrollo de la aplicación que podría tener en un futuro, utilizando la metodología ágil Scrum, debido a su enfoque iterativo, su capacidad de adaptación a entornos complejos y su orientación a la entrega continua de valor para el usuario, permitiendo organizar el trabajo de manera eficiente, incorporando retroalimentación constante y facilitando la evolución progresiva del producto. (Schwaber & Sutherland, 2020).

4.1 DISEÑO DE LAS FUNCIONALIDADES DE LA APP MÓVIL

Para la presente investigación, se ha contado con la colaboración de una empresa tecnológica que ha facilitado el diseño conceptual básico de la aplicación. Por razones de confidencialidad y acuerdo con la empresa proveedora, no es posible divulgar el nombre de la entidad ni detalles específicos que puedan comprometer su identidad o la privacidad de la herramienta, aunque se va a describir su funcionamiento y características principales para contextualizar su análisis.

El público objetivo de la aplicación serían los ciudadanos residentes en el municipio quienes registrarán sus reciclajes, paralelamente los ayuntamientos, que serían nuestros clientes, podrán obtener los datos que les permitirán monitorizar y aplicar de manera justa la tarifa siguiendo el modelo de pago por generación.

La aplicación, que se integraría dentro de una plataforma municipal ya existente, estará diseñada para digitalizar y simplificar los procesos relacionados con la recogida selectiva de residuos, incentivando la participación ciudadana mediante el uso de tecnologías interactivas y un sistema de feedback personalizado sobre el impacto ambiental de las acciones de reciclaje.

Funcionamiento básico

El diseño inicial contempla estas funcionalidades principales:

- Registrar una acción de reciclaje, mediante escaneo del código QR del contenedor y captura fotográfica de los materiales depositados.
- Consultar el historial y estadísticas principales, incluyendo cantidad de kilos reciclados, reducción estimada de CO₂ y comparativas con otros usuarios o zonas.
- Acceder a un asistente virtual basado en inteligencia artificial, que proporciona soporte sobre tipo de residuos, ubicación de contenedores y puntos limpios.

El sistema recopila información detallada para optimizar la gestión del reciclaje, incluyendo tipo de residuos por zona y usuario, niveles de participación, y frecuencia de reciclaje, todo ellos ligado a la ubicación geográfica y perfiles de usuarios.

Valor añadido

Esta herramienta representa un avance significativo en la digitalización de la gestión urbano de residuos, ya que integra funcionalidades de seguimiento personalizado, educación ambiental y gamificación, todo ello sin necesidad de las aplicaciones externas. Su implantación fortalece la conciencia ambiental local y mejora continuamente los resultados en gestión de residuos.

En resumen, la aplicación objeto de estudio constituye un ejemplo destacado de cómo la tecnología móvil puede apoyar estrategias sostenibles urbanas, combinando la participación ciudadana con datos concretos que permiten medir y mejora continuamente los resultados en gestión de residuos.

Beneficios que aporta

El uso de esta herramienta digital ofrece múltiples buenos para optimizar la gestión residuos urbanos y promover hábitos responsables en la ciudadanía:

- **Incremento por parte de la población:** Al facilitar un registro sencillo y ofrecer retroalimentación inmediata, se motiva a los usuarios a involucrarse activamente en el reciclaje, convirtiendo la acción en una experiencia interactiva y gratificante.
- **Conciencia ambiental reforzada:** Gracias a la información personalizada sobre el efecto sobre el medio ambiente como la reducción de emisiones de CO₂ y comparaciones con otras zonas, se genera mayor sensibilización y compromiso con la sostenibilidad.
- **Mejora en la calidad y cantidad de reciclaje:** El escaneo de contenedores y la toma de fotografías permiten un control más preciso y verificable de las acciones de reciclaje, reduciendo errores en la separación y aumentando la efectividad del sistema.
- **Educación y asesoramiento accesible:** El asistente inteligente basado en inteligencia artificial ofrece soporte inmediato para resolver dudas frecuentes sobre residuos, facilitando el aprendizaje continuo y la correcta segregación.
- **Optimización de recurso municipales:** Al disponer de datos geolocalizados y estadísticas detalladas, los responsables municipales pueden planificar mejor las rutas de recogida y diseñar campañas focalizadas, optimizando los costes y recursos.
- **Fomento de la competitividad saludable:** La posibilidad de comparar el desempeño entre barrios o distritos promueve un sentido de comunidad y competencia positiva, incentivando un mayor compromiso colectivo.

Desafíos y posibles limitaciones

A pesar de sus beneficios, la implementación y uso de esta aplicación también presenta ciertos retos que deben ser considerados:

- **Privacidad y gestión de datos:** La recopilación de información personal y geolocalizada requiere estrictos controles de privacidad y seguridad para proteger los datos de los usuarios y cumplir con la normativa vigente.
- **Accesibilidad y brecha digital:** No todos los ciudadanos pueden disponer de dispositivos móviles compatibles o sentirse cómodos usando tecnologías digitales, lo que puede limitar la participación y crear desigualdades.
- **Dependencia tecnológica:** Fallos técnicos o problemas de conectividad podrían afectar la experiencia del usuario y la fiabilidad del registro de reciclajes, requiriendo un soporte técnico eficaz y continuo.
- **Necesidad de campañas de sensibilización:** Para maximizar el impacto, es fundamental complementar la aplicación con campañas educativas que expliquen su uso y beneficios, evitando que se convierta en una herramienta infravalorada.
- **Escalabilidad y adaptación.** La aplicación debe ser adaptable a diferentes contextos urbanos y escalas, garantizando su funcionalidad tanto en grandes ciudades como en municipios más pequeños.

4.1.1 COMPARACIÓN CON MODELOS INTERNACIONALES

Para asegurar que la propuesta se ajusta a las mejores prácticas, se ha realizado un análisis comparativo con experiencias internacionales exitosas en sistemas de Pago por Generación (PxG), tales como Suecia, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur.

País	Aspectos clave del sistema PxG	Funcionalidades de interés	Relevancia
Suecia	Sistema de medición basado en peso con contenedores inteligentes; educación ciudadana constante; campañas de concienciación ambiental	Escaneo de QR y foto de la bolsa; notificaciones y gamificación para separación y compostaje	Permite cálculo preciso de residuos y tarifas; fomenta corresponsabilidad y aceptación ciudadana; adaptable a municipios pequeños y rurales
Países Bajos	Facturación según volumen; selección de tamaño de contenedor; obligatoriedad de separación de reciclables; cooperación intermunicipal	Selector de tipo/tamaño de contenedor virtual; tutoriales y alertas de separación; conexión con servicios compartidos (centros de reciclaje)	Facilita que los ciudadanos ajusten su coste según hábitos; incentiva separación en origen; cooperación para optimizar recursos
Alemania	Tarifas según volumen y frecuencia; recogida de residuos orgánicos; sistema Pfand para envases; cooperación intermunicipal	Registro de residuos orgánicos; recompensas por compostaje; escaneo de envases retornables con puntos/recompensas	Incentivo compostaje doméstico; fomenta retorno de envases y reciclaje; optimiza costes mediante colaboración entre municipios
Bélgica (Flandes)	Tarifas diferenciadas por tipo y volumen; subsidios para compostaje; responsabilidad ampliada del productor (EPR); cooperación público-privada	Visualización de coste según residuo; recompensas por compostaje; información sobre EPR; conexión con infraestructuras locales	Penaliza residuos no reciclables; incentiva separación y compostaje; promueve economía circular y colaboración público-privada
Estados Unidos (San Francisco)	Obligación de separar residuos; programas de educación ambiental; sanciones por incumplimiento	Alertas sobre normas y posibles sanciones; contenido educativo y campañas	Garantiza cumplimiento ciudadano; fomenta cambio cultural hacia hábitos sostenibles
Japón	Separación detallada por tipo de residuo; tarifas según cantidad y tipo; responsabilidad ampliada del productor; campañas de educación ambiental	Guías y calendario de recolección según tipo de residuo; información sobre EPR	Aumenta eficiencia del reciclaje; facilita separación correcta y participación ciudadana
Corea del Sur	Bolsas de basura prepagadas; contenedores inteligentes; incentivos por reciclaje; apoyo técnico y financiero central	Registro digital de bolsas prepagadas y volúmenes; gamificación y recompensas por separación correcta	Permite cálculo preciso de tarifas PxG; incentivo reciclaje; aplicable con respaldo técnico y financiero estatal

TABLA 3. COMPARATIVA FUNCIONAL ENTRE MODELOS INTERNACIONALES DE GESTIÓN DE RESIDUOS

(Fuente: Elaboración propia basada en Frago-Martínez & Rivera-Fernández, 2025)

Este estudio ha permitido identificar buenas prácticas, innovaciones tecnológicas y mecanismos de incentivos que sirven de inspiración para rediseñar las funcionalidades de base que teníamos.

Por ello, se ha seleccionado un conjunto de funcionalidades finales que se incorporarán al diseño inicial de la aplicación con el fin de mejorarlo, manteniendo sus elementos básicos, pero incorporando mejoras para garantizar que la aplicación sea motivadora, eficiente y adaptada a las necesidades de la administración pública y de los ciudadanos.

TABLA 4. FUNCIONALIDADES FINALES DE LA PROPUESTA

Funcionalidad	Inspiración / Diseño inicial	Objetivo / Valor añadido
Escaneo QR + foto	Diseño inicial	Verificar y registrar la acción de reciclaje con precisión.
Registro de peso o volumen	Suecia, Corea del sur	Calcular tarifas PxG de manera precisa
Historial y estadísticas personales	Diseño inicial	Feedback sobre contribución individual y comparativa con otros usuarios o zonas.
Asistente virtual inteligente	Diseño inicial	Orientar sobre tipos de residuos, ubicación de contenedores y puntos limpios.
Gamificación (badges, puntos, recompensas)	Alemania, Bélgica, Corea del Sur	Incentivar la participación y hábitos sostenibles mediante motivación positiva.
Alertas y notificaciones	Suecia, Países Bajos, San Francisco	Recordatorios y orientación sobre separación de residuos y compostaje.

Funcionalidad	Inspiración / Diseño inicial	Objetivo / Valor añadido
Compostaje doméstico	Alemania, Bélgica	Registrar y premiar compostaje domiciliario, reduciendo residuos orgánicos.
Información sobre responsabilidad del productor (EPR)	Bélgica, Japón	Educar sobre la implicación de productores y fomentar la economía circular.
Visualización de impacto ambiental	Diseño inicial, Suecia	Mostrar reducción de CO ₂ , kilos reciclados y otros indicadores de sostenibilidad.
Conexión con infraestructuras municipales / colaboración intermunicipal	Países Bajos, Alemania, Bélgica	Optimizar rutas, recursos y servicios compartidos.
Contenido educativo y campañas informativas	Suecia, San Francisco, Japón	Aumentar concienciación y correcta segregación de residuos.
Sistema de sanciones o alertas de incumplimiento opcional	San Francisco, Japón	Refuerzo del cumplimiento ciudadano y efectividad del sistema PxG.

TABLA 5. FUNCIONALIDADES FINALES DE LA PROPUESTA

(Fuente: Elaboración propia basa en Fragoso-Martínez & Rivera-Fernández, 2025)

Tras el análisis comparativo y la identificación de buenas prácticas internacionales, las funcionalidades seleccionadas para la aplicación no se limitan a una simple traslación de modelos extranjeros, sino que han sido adaptadas al contexto español y a la infraestructura municipal existente. En este sentido, el diseño básico de la app (registro mediante QR y foto,

historial de reciclaje y asistente virtual) se complementa con mejoras inspiradas en países líderes en gestión de residuos.

Una de las principales incorporaciones es el registro de peso o volumen de los residuos, inspirado en Suecia y Corea del Sur, donde se utilizan contenedores inteligentes y bolsas prepagadas. Dado que la implantación de estas infraestructuras resulta costosa y difícil de generalizar en España a corto plazo, se propondrá una alternativa viable: el uso de inteligencia artificial para estimar el volumen y peso de la bolsa fotografiada por el usuario, a través del método desarrollado por (Dalai & Senapati, 2017) que comentaremos con más profundidad en el estudio de la viabilidad técnica. De esta forma, se mantiene el espíritu del PxG (Pago por Generación), pero con un mecanismo accesible y escalable para los ayuntamientos.

Para llevar a cabo el cálculo de la tasa, en estudios previos en Países Bajos (Dijkgraaf & Gradus, 2004) se ha observado que se emplea un modelo econométrico de datos de panel para analizar el impacto de los sistemas de tarificación por generación (conocidos como Unit-Based Pricing, UBP) en la cantidad de residuos generados por los municipios. El modelo tiene en cuenta tanto las variaciones entre municipios como a lo largo del tiempo, lo que permite estimar con mayor precisión los efectos del sistema PxG.

La ecuación estimada es la siguiente:

$$\text{Waste}_{w,i,t} = \alpha_s \text{UBP}_s + \beta \text{SE} + c_i + d_t + \varepsilon_{i,t},$$

FIGURA 2. ECUACIÓN ECONOMÉTRICA DE LOS PAÍSES BAJOS

(Fuente : Dijkgraaf & Gradus, 2004)

Donde:

- **Waste_{w,i,t}** representa la cantidad de residuos del tipo w generados en el municipio i en el año t.

- **UBP_s** son variables ficticias (dummies) que indican si el municipio aplica un sistema de tarificación por generación de tipo s en ese año
- **SE** es un vector de características socioeconómicas (nivel de renta, densidad de población, etc.).
- **c_i** son los efectos fijos específicos de cada municipio, constantes en el tiempo, que capturan diferencias estructurales regionales.
- **d_t** representa los efectos fijos de cada año, es decir, factores comunes que afectan a todos los municipios en un mismo periodo (como reformas legislativas).
- **ε_{i,t}** es el término de error aleatorio, que se asume normalmente distribuido y corregido, si es necesario, por heterocedasticidad transversal.

Este modelo demuestra que la implantación de sistemas PxG puede reducir significativamente la generación de residuos no reciclables. De hecho, según sus resultados, algunas ciudades europeas que aplican PxG lograron disminuir en torno a un 20% la cantidad total de residuos generados (Dijkgraaf & Gradus, 2004).

A partir de la fórmula citada anteriormente, podemos deducir una ecuación propuesta adaptada que podría ser útil para el cálculo justo de la tasa:

TASA PxG = (kg generados de residuos totales - kg reciclados correctamente) × factor penalización.

Esta fórmula es una representación simplificada del cálculo que muchos municipios europeos utilizan bajo el principio "Pay-As-You-Throw" (PAYT). La idea central es que solo se paga por la fracción no reciclada.

La función de gamificación, recogida de experiencias en Corea del Sur, Alemania o Bélgica, permitirá al usuario acumular puntos, recibir insignias digitales (badges) y alcanzar niveles de participación en función de sus hábitos sostenibles. Este módulo busca reforzar la motivación ciudadana mediante recompensas simbólicas, evitando sanciones directas, pero promoviendo la mejora continua de los hábitos de reciclaje.

Las notificaciones inteligentes y campañas educativas, inspiradas en Suecia, Japón o Estados Unidos, se integran con el historial de reciclaje. De esta manera, el sistema podrá enviar recordatorios personalizados (“Hoy toca sacar el papel”, “Recuerda separar el orgánico”) y consejos prácticos para mejorar la clasificación de residuos.

El módulo de información ampliada incorporará apartados sobre la responsabilidad ampliada del productor (EPR), siguiendo los modelos de Japón y Bélgica, así como sobre puntos de recogida municipales e intermunicipales (Países Bajos, Alemania), lo que ayudaría no solo a educar al ciudadano, sino que también favorecería la transparencia y la economía circular.

Finalmente, la aplicación ofrecerá indicadores ambientales visuales, mostrando de manera sencilla la reducción de CO₂, los kilogramos reciclados y la posición relativa respecto a la media de la zona. Este feedback directo busca generar una sensación de contribución tangible y fomentar la implicación comunitaria.

En conjunto, la aplicación parte de un diseño básico realista y lo enriquece con funcionalidades seleccionadas de modelos internacionales, garantizando así una solución adaptada al contexto español, técnicamente viable y alineada con las directrices de la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022) y las estrategias de Smart Cities.

4.1.2 COMPARACIÓN CON RECICLOS DE ECOEMBES

Resulta pertinente realizar una comparación con la aplicación RECICLOS, un sistema de gestión de recompensas digital desarrollado por Ecoembes (*Reciclos* | Ecoembes, s. f.) Esta solución tecnológica fomenta el reciclaje de envases de latas y botellas mediante el escaneo de códigos QR, permitiendo a los usuarios acumular puntos que pueden ser

canjeados por participaciones en sorteos, donaciones a causas sociales o diversos beneficios. El objetivo principal de RECICLOS es promover la adopción de hábitos sostenibles entre la ciudadanía, aprovechando las tecnologías móviles y la participación de los usuarios en la mejora del medio ambiente.

De este modo, la aplicación contribuye a la sensibilización ambiental y al fomento de la responsabilidad social, integrando incentivos digitales en la estrategia de gestión de residuos urbanos.

Característica	APP del proyecto	RECICLOS (ECOEMBES)	Valor añadido en nuestra propuesta
Escaneo de código QR	Sí, en el contenedor de reciclaje, vinculando cada acción al usuario.	Sí (en bolsas y latas/botellas)	Nuestra propuesta permite identificar y asociar cada acción de reciclaje de forma directa, mejorando la trazabilidad frente al modelo de RECICLOS
Foto del residuo	Sí, permite estimar tipo y peso aproximado mediante IA	No obligatorio	Aumenta la precisión del registro de residuos y posibilita un sistema PxG más justo y transparente.
Incentivos	Impacto ambiental, datos personalizados, participación local, premios	Premios, sorteos, donaciones	No solo premia al usuario, sino que fomenta hábitos sostenibles y compromiso con la comunidad.
Integración en app municipal	Sí, conectando con la gestión municipal	No	Permite la coordinación directa con servicios municipales y análisis de la generación de residuos

Seguimiento por zona y usuario	Sí (zona, tipo de residuo, frecuencia)	Sí (individual, limitado por diseño)	Ofrece un seguimiento más completo y flexible.
Asistente de IA	Sí, guía al usuario, sugiere mejorar y clasifica residuos	No	Facilita la educación ambiental y la correcta segregación de residuos
Funcionalidad educativa	Presenta informes y comparativas ambientales entre otros.	Ofrece información, pero limitada a envases de bebida y a instrucciones básicas.	Al incluir comparativas ambientales, reportes personalizados, gamificación, informes sobre impacto ambiental, la funcionalidad educativa es alta.
Adaptación al marco legal y normativo	Cumple con Ley 7/2022 y principios del pago por generación.	Aunque fomenta el reciclaje, no cumple completamente con todos los requisitos de la ley, como la trazabilidad, control del peso/volumen, etc.	Nuestra aplicación se alinea con los principios que exige la ley.
Escalabilidad y replicabilidad	Fácilmente adaptable a otras ciudades y escalable	Limitada, enfoque más específico y menos flexible	Al no depender de máquinas físicas ni puntos de recogida preestablecidos, ni de ciertos tipos de residuos como es el caso de RECICLOS, la escalabilidad es alta.

TABLA 6. RECICLOS (ECOEMBES) VS APP DEL PROYECTO

(Fuente: Elaboración propia basada en *Reciclos | Ecoembes*, s. f.)

La tabla refleja que la aplicación desarrollada en este proyecto proporciona una solución integral y avanzada para la gestión de residuos, destacando por su integración completa en la aplicación municipal oficial, lo que evita la necesidad de herramientas externas y facilita la gestión local. Esta integración permite la generación de datos geolocalizados y estadísticas de impacto que mejoran la recogida selectiva y la toma de decisiones basada en información precisa.

Además, la plataforma fortalece la conciencia ambiental entre los ciudadanos y fomenta una competitividad saludable entre barrios y distritos, incentivando la participación y el compromiso comunitario. El uso de tecnologías innovadoras, como el asistente de inteligencia artificial y la posibilidad de registrar fotografías de los residuos que logren medir el peso, contribuye a mejorar la calidad y precisión del seguimiento, mientras que la funcionalidad educativa robusta promueve un cambio de comportamiento sostenible.

En términos normativos, esta solución se ajusta plenamente a los objetivos de la Ley 2/2022, que establece la necesidad de fomentar la prevención, la recogida selectiva y la corresponsabilidad en la gestión de residuos (Del Estado, 2022). Asimismo, incorpora el principio PAYT (Pay As You Throw), favoreciendo una asignación justa y proporcional de los costes en función de la cantidad real de residuos generados por hogar.

Por su parte, la plataforma comparada se centra en incentivos tradicionales y ofrece un seguimiento menos detallado y sin integración municipal, lo que limita su capacidad para gestionar los residuos de forma precisa y alineada con la normativa vigente.

En definitiva, la solución del proyecto representa una propuesta más completa, tecnológicamente avanzada y legalmente adaptada, que facilita una gestión sostenible y eficiente de residuos, alineada con los retos ambientales actuales.

4.1.3 EJEMPLO PRÁCTICO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA APP: USUARIO

En el Anexo I, se encuentran los diagramas de flujo de la parte interna y externa de la aplicación permitiendo desde una perspectiva más visual, cómo sería el proceso de la herramienta propuesta.

En este apartado vamos a proponer un ejemplo del funcionamiento básico para que pueda entenderse desde un aspecto más visual.

Flujo de uso

Usuario : María va a reciclar.

Objetivo: registrar correctamente el reciclaje de sus residuos.

1. Inicio de sesión y acceso a la app

- María abre la aplicación en su dispositivo móvil.
- Ingresa sus credenciales de usuario vinculadas a su vivienda, cumpliendo con la normativa de protección de datos.
- Selecciona en el menu principal : “Voy a reciclar”.

2. Escaneo del contenedor

- María se dirige al contenedor correspondiente y escanea el código QR ubicado en el contenedor.
- La app identifica el contenedor y registra la ubicación y la categoría de residuo.

3. Registro mediante fotografía

- La app solicita a María que tome una fotografía del residuo depositado.
- La inteligencia artificial (IA) analiza la imagen para verificar que el residuo coincide con la categoría seleccionada y estima el peso o volumen aproximado.

4. Confirmación y acumulación de puntos

- Una vez validado, la app confirma el registro y acumula puntos de recompensa en el perfil de María.

5. Historial y seguimiento

- María puede consultar su historial de reciclaje, su impacto ambiental (kg de residuos reciclados, reducción de CO₂) y recomendaciones personalizadas para mejorar su gestión de residuos.

6. Feedback y notificaciones

- La app envía notificaciones sobre eventos municipales, recordatorios de reciclaje o nuevas iniciativas sostenibles, fomentando la participación ciudadana.

4.2 PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN USANDO LA METODOLOGÍA SCRUM

La aplicación práctica de Scrum para la propuesta desarrollo de la app se fundamenta en los principios y reglas establecidos en La Guía Definitiva de Scrum(Schwaber & Sutherland, 2020).Esta metodología ágil propone un marco de trabajo iterativo e incremental que permite gestionar proyectos complejos mediante ciclos cortos denominados Sprints, facilitando la entrega continua de valor y la adaptación constante a las necesidades cambiantes.

Scrum se basa en roles bien definidos, eventos estructurados, artefactos transparentes y reglas que garantizan la inspección y adaptación del proceso. Esta estructura promueve la colaboración estrecha entre el equipo de desarrollo, el Product Owner , el Scrum Máster y el consultor de Smart City, facilitando una comunicación efectiva y una mejora continua del producto y del proceso.

La implementación de Scrum en este proyecto se orienta a maximizar la productividad y la calidad del desarrollo de la aplicación, permitiendo responder con agilidad a los requisitos normativos, técnicos y de usuario propios de una Smart City.

Dado que en este proyecto no se contempla su desarrollo completo para la implementación del sistema, para garantizar una propuesta con enfoque profesional, se ha diseñado la organización del equipo de trabajo y la planificación de sprint siguiendo la metodología Scrum, permitiendo demostrar de manera estructurada como se gestionaría el proyecto en un hipotético caso real.

Formación del equipo Scrum

El equipo se organizaría en tres roles fundamentales, todos necesarios para asegurar un flujo de trabajo ágil y eficiente:

Rol	Función específica dentro del desarrollo de la app
Product Owner: TATIANA BRUNOLDI	Encargada de recopilar las necesidades de los ciudadanos, interpretar la normativa aplicable (Ley 7/2022, PAYT), y priorizar las funcionalidades del producto. Define y mantiene el Product Backlog, representando los intereses del municipio y los usuarios finales.
Scrum Master	Responsable de Innovación del proyecto (rol asumido por un miembro experto en innovación digital). Facilita la aplicación correcta del marco Scrum, ayuda al equipo a eliminar impedimentos, guía el proceso ágil y garantiza la mejora continua en los Sprints. El Scrum Máster podría organizar las reuniones diarias (Daily Standups), facilitar la colaboración entre los miembros del equipo y asegurarse de que las tareas se completan de manera continua y sin bloqueos

Equipo de desarrollo

Equipo multidisciplinar conformado por:

- Consultor en Smart City
Especialista en servicios urbanos inteligentes, responsable de validar la coherencia funcional del producto con el ecosistema Smart City, así como con las necesidades de interoperabilidad y eficiencia.
- Desarrolladores tecnológicos
Encargado del desarrollo técnico y de la arquitectura de la app, así como de la implementación de tecnologías como IA, IoT, blockchain y módulos PAYT.

TABLA 7. ROLES DE SCRUM PARA LA APP

(Fuente: Elaboración propia basada en Schwaber & Sutherland, 2020.)

Diseño funcional inicial

Como paso previo a los Sprints, se tendrían que definir las funcionalidades básicas que debería incorporar la aplicación, en línea con los objetivos de sostenibilidad, trazabilidad y concienciación ambiental del sistema. Estas funcionalidades no constituyen una especificación cerrada, sino una hipótesis funcional:

- Registro de acciones de reciclaje mediante escaneo de código QR.
- Validación mediante fotografía del residuo.
- Sistema de incentivos y recompensas personalizados y sanciones.
- Integración de un asistente conversacional inteligente.
- Contenido educativo ambiental dinámico y adaptado.

Desarrollo iterativo por Sprints

El proceso de desarrollo se organizaría en Sprint de 2 a 5 semanas. Cada Sprint comprendió los siguientes eventos definidos por Scrum:

- *Sprint Planning*: planificación del Sprint, definición del objetivo y selección de ítems funcionales.
- *Daily Scrum*: reuniones diarias breves para sincronizar el trabajo y ajustar desviaciones.
- *Sprint Review*: presentación del incremento funcional y recogida de feedback de los stakeholders.
- *Sprint Retrospective*: evaluación del proceso y planteamiento de mejoras para el siguiente Sprint.

Iteraciones clave y adaptación funcional

Sprint	Duración	Objetivo principal	Funcionalidades incluidas
1	2 semanas	Registro inicial de usuarios	Registro de usuarios y Log in
2	5 semanas	Control y verificación de reciclaje	Escaneo QR + foto, Registro de peso/volumen
3	3 semanas	Historial y estadísticas	Historial personal, Visualización de impacto ambiental
4	4 semanas	Comunicación con el usuario	Asistente virtual inteligente, Alertas y notificaciones

Sprint	Duración	Objetivo principal	Funcionalidades incluidas
5	3 semanas	Motivación y gamificación	Gamificación (badges, puntos, recompensas), Compostaje doméstico
6	4 semanas	Integración con infraestructuras	Conexión con infraestructuras municipales / colaboración intermunicipal
7	3 semanas	Educación y cumplimiento	Contenido educativo y campañas, Información EPR
8	2 semanas	Sistema de sanciones	Sistema de sanciones o alertas de incumplimiento opcional
9	2 semanas	Revisión final	Ajustes finales y pruebas

TABLA 8. SPRINT FINALES

(Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se describen con más profundidad cada sprint, destacando cómo los eventos Scrum facilitarían la mejora progresiva del producto:

Sprint 1 – Registro inicial de usuarios

- **Sprint Planning:** se definiría como objetivo habilitar el registro de usuarios y el inicio de sesión, estableciendo las tareas necesarias para la creación de formularios, validación de datos y seguridad de contraseñas.
- **Daily Scrum:** reuniones diarias para revisar avances en el desarrollo de la base de datos de usuarios, validación de formularios y resolución de errores de registro.

- **Sprint Review:** se presentarían los formularios funcionales y el proceso de Log in, evaluando la usabilidad y seguridad de los datos.
- **Sprint Retrospective:** se acordarían mejoras en la experiencia de registro, validación de campos y flujo de inicio de sesión para optimizar la accesibilidad

Funcionalidad final: Usuarios pueden registrarse y acceder a la app con Log-in seguro.

Sprint 2 – Control y verificación

- **Sprint Planning:** se definiría como la implementación del escaneo de códigos QR en los contenedores y el registro mediante fotografías de los residuos depositados, incorporando un sistema de estimación aproximada de peso/volumen a partir de la imagen, sabiendo la clasificación del residuo (plástico, cartón, vidrio, etc).
- **Daily Scrum:** reuniones diarias para supervisar la integración del lector QR, la vinculación con el perfil del usuario y el desarrollo de la funcionalidad de captura y procesamiento de fotos para la estimación del peso.
- **Sprint Review:** se podría detectar que los archivos de imagen podrían ralentizar la aplicación o fallos en las lecturas del QR. Lo más recomendable sería hacer pruebas con usuarios piloto para evaluar la precisión en la lectura de los QR y la usabilidad de la carga de fotografías, con el fin de poder comprobar que el sistema genere una estimación razonable del peso/volumen.
- **Sprint Retrospective:** en este caso se implementaría una solución basada en aumentar la robustez frente a los problemas comunes como errores en la lectura del QR, mala calidad de las fotos o diferencias en la estimación del peso.

Funcionalidad final: Los usuarios podrán registrar sus acciones de reciclaje escaneando el QR del contenedor y subiendo una foto de los residuos, obteniendo una estimación aproximada de peso o volumen.

Sprint 3 – Historial y estadísticas

- **Sprint Planning:** se creará la sección de historial personal y visualización del impacto ambiental, incluyendo gráficas y resúmenes de reciclaje.
- **Daily Scrum:** Se llevaría a cabo un seguimiento diario de la integración de la base de datos con la interfaz de usuario y generación de estadísticas visuales.
- **Sprint Review:** Se harán pruebas con usuarios internos para evaluar la claridad y utilidad del historial y de las estadísticas.
- **Sprint Retrospective:** mejoraría la presentación de datos y la comprensión del impacto ambiental.

Funcionalidad final: los usuarios podrán consultar su historial de reciclaje y visualizar su impacto ambiental.

Sprint 4 – Comunicación con el usuario

- **Sprint planning:** se integrará el asistente virtual inteligente y las alertas/notificaciones, estableciendo tareas para la conexión con el historial y el perfil del usuario.
- **Daily Scrum:** se deberían hacer supervisiones diarias de la configuración de notificaciones, del entrenamiento del asistente virtual y la personalización de alertas.
- **Sprint Review:** sería recomendable hacer pruebas con usuarios para evaluar la efectividad de las notificaciones y la precisión del asistente virtual.

- **Sprint Retrospective:** se decidirían mejoras en el flujo de conversación del asistente, la frecuencia de alertas y la personalización de mensajes.

Funcionalidad final: los usuarios recibirían notificaciones y pueden interactuar con un asistente virtual inteligente.

Sprint 5 – Motivación y gamificación

- **Sprint Planning:** el objetivo sería la correcta implementación de gamificación (badges, puntos, recompensas) y la funcionalidad de compostaje doméstico.
- **Daily Scrum:** reuniones para que se pudiera revisar la asignación de puntos, desbloqueo de badges y funcionamiento de recompensas, así como seguimiento de la información sobre compostaje.
- **Sprint Review:** se revisaría la experiencia de gamificación con usuarios piloto, evaluando la comprensión de las funcionalidades de compostaje.
- **Sprint Retrospective:** se acordarían ajustes en el sistema de puntos, badges y recompensas para maximizar el engagement del usuario.

Funcionalidad final: los usuarios podrán acumular puntos, desbloquear badges, recibir recompensas y acceder a información de compostaje doméstico.

Sprint 6 – Integración con infraestructuras

- **Sprint Planning:** el objetivo se basaría en poder conectar la app con infraestructuras municipales y colaboración intermunicipal, incluyendo tareas de API (Interfaz de Programación de Aplicaciones), permisos y sincronización de datos.

- **Daily Scrum:** se plantearían reuniones diarias para monitorear la integración técnica, resolver problemas de comunicación entre sistemas y validar la transferencia de datos.
- **Sprint Review:** Sería recomendable realizar pruebas con funcionarios municipales y usuarios para evaluar la precisión de la integración y la funcionalidad colaborativa entre municipios.
- **Sprint Retrospective:** se decidirían mejoras en la sincronización de datos.

Funcionalidad final: la app se conectará con infraestructuras municipales y permitirá colaboración intermunicipal

Sprint 7 – Educación y cumplimiento

- **Sprint Planning:** el objetivo sería incluir contenido educativo, campañas de concienciación y acceso a información sobre Responsabilidad Extendida del Productor (ERP).
- **Daily Scrum:** Reuniones diarias para que aseguren la correcta integración de contenido multimedia, enlaces y materiales educativos interactivos.
- **Sprint Review:** se harían pruebas para evaluar la claridad, relevancia y accesibilidad del contenido educativo.
- **Sprint Retrospective:** se acordarían mejoras en la presentación y personalización del contenido para fomentar la educación ambiental.

Funcionalidad final: los usuarios accederán a contenido educativo y campañas de reciclaje.

Sprint 8 – Sistema de sanciones

- **Sprint Planning:** el objetivo sería la implementación de un sistema de sanciones o alertas de incumplimiento.
- **Daily Scrum:** se harían reuniones diarias con el fin de supervisar la implementación de alertas y los posibles errores.
- **Sprint Review:** pruebas donde se pueda verificar la correcta ejecución de sanciones o alertas.
- **Sprint Retrospective:** sistema de alertas y sanciones.

Funcionalidad final: la app contaría con alertas de incumplimiento.

Sprint 9 – Revisión final

- **Sprint Planning:** el objetivo sería realizar ajustes finales y pruebas para verificar el correcto funcionamiento de toda la aplicación.
- **Daily Scrum:** reuniones diarias donde se controlaría los ajustes finales en todas las funcionalidades y la depuración de errores.
- **Sprint Review:** lo ideal sería hacer pruebas completas de la app con usuarios y stakeholders, verificando todas las funcionalidades y la correcta ejecución de estas.
- **Sprint Retrospective:** se definirían mejoras finales en la usabilidad, rendimiento y robustez de la app antes de su lanzamiento

Funcionalidad final: Verificación de que todas las funcionalidades de la app serán eficaces.

Gracias al desglose de estos sprint, se va a realizar un diagrama GANT el cual sirva de referente para conocer los gastos que podríamos tener y poder llevar a cabo un estudio económico en función de las semanas que se necesitarían para poder completar el proyecto.

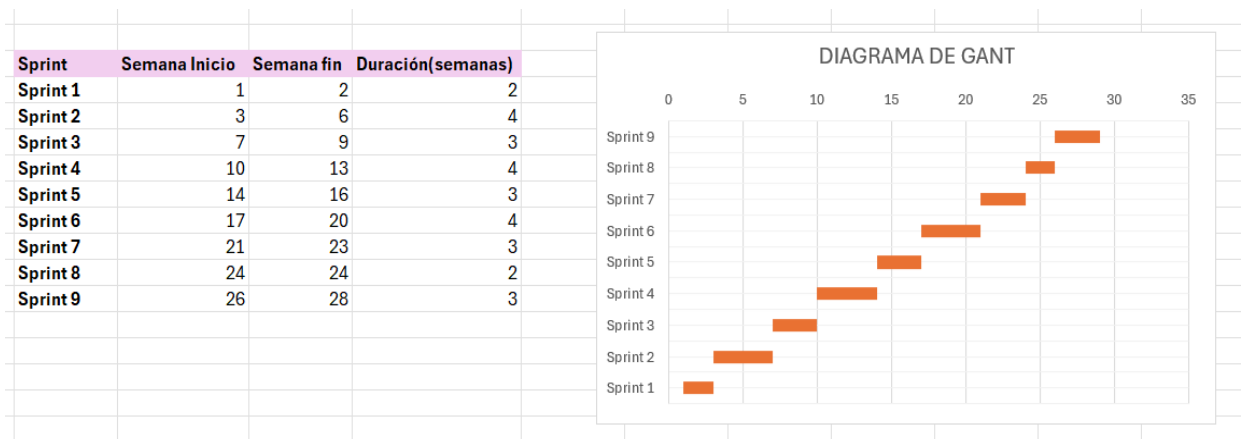


FIGURA 3. DIAGRAMA GANT DE LA PROPUESTA

(Fuente: Elaboración propia)

Como vemos en nuestro diagrama de GANT, vamos a necesitar 28 semanas. Conociendo este dato, en el capítulo del estudio económico se desarrollará el costo de la inversión inicial teniendo en cuenta la duración de dicho proyecto.

5 ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICA

A la hora de justificar la viabilidad técnica de la propuesta desarrollada en este Trabajo Fin de Grado, que tiene como funcionalidad principal implementar el sistema PxG de residuos urbanos mediante inteligencia artificial (IA), se va a tener en cuenta tres pilares fundamentales:

1. Las experiencias internacionales exitosas de reducción de residuos no reciclables, que demuestran la factibilidad de modelos tecnológicos similares.

2. La validación tecnológica del uso de la IA para el cálculo de peso o volumen de residuos mediante imagen.
3. La coherencia con la legislación vigente en materia de residuos y economía circular.

5.1 FUNDAMENTACIÓN EN EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EXISTENTES

La viabilidad técnica del modelo propuesto se encuentra ampliamente respaldada por la evidencia empírica internacional, como vimos en capítulos anteriores, tanto en los fundamentos teóricos como en la parte práctica, países como Suecia, Alemania, Corea del Sur, etc, han implementado sistemas de pago por generación (PxG) con resultados positivos en términos de residuos, aumento de reciclaje, concienciación ciudadana y mejora del control municipal.

Estos sistemas, aunque diversos en su aplicación (pesaje directo, etiquetado RFID, bolsas con código, contenedores inteligentes, etc.) demuestran que la gestión individualizada de residuos es técnicamente posible y que las tecnologías de identificación y control son un factor clave para su éxito.

Por tanto, la aplicación propuesta se apoya en una base tecnológica ya probada a nivel internacional, adaptada a la realidad española mediante un enfoque más accesible y digital.

El uso de tecnologías móviles, códigos QR y análisis con IA de imágenes, representan una alternativa técnicamente viable y económicamente eficiente frente a los sistemas inteligentes de alto coste empleados en algunos países europeos.

Esto permite trasladar el principio PxG al contexto municipal español sin requerir de una transformación completa de la infraestructura de recogida existente.

5.2 VALIDACIÓN TÉCNICA DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Otro elemento que consolida la viabilidad técnica del proyecto es la aplicación de inteligencia artificial para la estimación del peso o volumen del residuo a partir de fotografías tomadas por el usuario.

Este enfoque encuentra su verificación en el estudio experimental realizado por (Dalai & Senapati, 2017) que demuestra la capacidad de los algoritmos de visión por computador y de aprendizaje automático para reconocer materiales, estimar dimensiones y aproximar pesos con márgenes de error aceptables para su uso en sistemas de clasificación y registros.

Los resultados evidencian que el modelo propuesto ofrece una precisión suficiente para el cálculo relativo de residuos, lo cual permite establecer un sistema de trazabilidad ciudadana sin necesidad de instalar dispositivos de pesaje físicos, reduciendo significativamente la complejidad técnica y el coste de implantación.

Esta validación empírica demuestra que la herramienta propuesta es técnicamente factible y que las tecnologías empleadas son accesibles aportando tres ventajas fundamentales:

- Escalabilidad: puede aplicarse en municipios de cualquier tamaño, sin requerir infraestructuras físicas avanzadas.
- Reducción de costes: evita la inversión en contenedores con sensores o básculas integradas.
- Interoperabilidad: permite integrar la información en plataformas municipales existentes, facilitando la trazabilidad y la toma de decisiones.

Aunque su desarrollo completo podría requerir de una fase de prototipo y calibración de los modelos de IA, la tecnología necesaria (procesamiento de imagen, aprendizaje profundo y sistemas móviles de captura), ya está disponible y validada. Por tanto, su aplicación al ámbito de la gestión de residuos puede considerarse técnicamente viable en un

horizonte próximo con márgenes de mejora progresiva, concibiéndose como una tecnología habilitadora que permitiría avanzar hacia sistemas de pago por generación más justos.

5.3 CUMPLIMIENTO NORMATIVO

La propuesta estudiada se ha ido planteando para que sea plenamente coherente con el marco legislativo europeo y español, el cuál impulsa la transición hacia modelos de gestión de residuos digitalizados, trazables y participativos.

El diseño pretende cumplir con la Ley 7/2022(Del Estado, 2022), y con las normativas de protección de datos y seguridad de la información, concretamente con el Reglamento General de la Protección de Datos (RGPD) y la Ley Orgánica 3/2018 (Del Estado, 2018), garantizando que la información personal y geolocalizada se gestione bajo criterios de confidencialidad. (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), s. f.). Esto lo consigue integrando las siguientes funcionalidades esenciales:

Trazabilidad y responsabilidad económica

Conforme a los artículos 11.1 y 11.3 de la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022), la aplicación permite:

- La identificación clara y vinculante del productor o poseedor de residuos.
- La implementación de sistemas tarifarios proporcionales y no deficitarios, que reflejan el coste real del servicio.

Medidas para incentivar

Basado en lo estipulado en el Anexo V, dónde se recogen ejemplos de instrumentos económicos para incentivar la jerarquía de residuos de la Ley 7/2022 (Del Estado, 2022), la solución tecnológica facilitaría:

- Bonificaciones y reducciones de tasas para los usuarios que separen correctamente los residuos y generen una menor cantidad de fracción resto., permitiendo una trazabilidad individualizada.

Alineación con la prevención de residuos.

En coherencia con el artículo 18 de la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Del Estado, 2022), cuyo objetivo principal es prevenir la generación de residuos, la aplicación móvil desarrollada contribuye activamente a este fin fomentando hábitos sostenibles entre la ciudadanía. En particular, la aplicación se alinea con las medidas recogidas en los apartados 1.a), 1.d) y 1.m) del citado artículo, al promover un modelo de consumo responsable, apoyar la reutilización de productos y ofrecer contenidos y funcionalidades orientadas a la sensibilización y educación ambiental.

Estas funciones permiten no solo reforzar el cumplimiento de los principios de economía circular, sino también involucrar activamente al usuario en la reducción de residuos domésticos, especialmente mediante el registro y control de sus hábitos de reciclaje y la recepción de recomendaciones personalizadas.

Competencias administrativas.

La propuesta tecnológica analizada se alinea con las competencias que, según el artículo 12 de la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular

(Del Estado, 2022), corresponden a las entidades locales en materia de gestión de residuos domésticos.

De acuerdo con el artículo 12.5.a), las entidades locales son responsables, como servicio público obligatorio, de la recogida, transporte y tratamiento de los residuos domésticos. Además, el artículo 12.5.c) les atribuye la obligación de recopilar, elaborar y actualizar la información necesaria para el cumplimiento de la normativa en materia de residuos, incluyendo los datos relativos a los modelos de recogida, las cantidades recogidas y tratadas, y su destino final (Del Estado, 2022).

En este marco, la aplicación se concibe como una herramienta tecnológica clave para apoyar a la gestión municipal, ofreciendo una infraestructura digital que facilite la recogida y análisis de datos sobre la generación de residuos. Gracias a su diseño conceptual, el sistema podría contribuir a:

- Establecer tasas personalizadas y equitativas según el volumen de residuos generados.
- Incentivar la correcta separación y reducción de residuos desde el origen.
- Mejorar la trazabilidad y control del flujo de residuos urbanos.
- Generar datos fiables para la planificación y la mejora continua de los sistemas municipales de gestión.

Por tanto, la herramienta desarrollada constituye un instrumento tecnológico de apoyo a la gestión municipal de residuos, reforzando el cumplimiento de los mandatos legales y permitiendo avanzar hacia un modelo más justo, eficiente y sostenible. Además, fomenta la participación ciudadana activa y la corresponsabilidad en la gestión de los residuos generados, elementos esenciales en el marco de una Smart City comprometida con la economía circular.

6 ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA

El desarrollo de una aplicación móvil para la gestión inteligente de residuos en el contexto de una Smart City no solo responde a desafíos ambientales y normativos, sino que

también plantea oportunidades concretas de optimización económica. Este capítulo analiza, en primer lugar, los beneficios operativos y financieros que puede generar la digitalización en la gestión municipal de residuos, así como las posibles vías de financiación pública disponibles. Finalmente, se evalúa la viabilidad económica del proyecto a través de un análisis del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), dos indicadores clave para estimar su rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

6.1 BENEFICIOS DE LA DIGITALIZACIÓN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES

La gestión de los residuos municipales en España constituye uno de los principales retos ambientales y económicos para las administraciones locales. Según el informe de la Autoridad Independiente de Responsabilidad Fiscal (AIReF), en el año 2021 las entidades locales destinaron un total de 3.964 millones de euros a la gestión de residuos municipales, cifra que evidencia la relevancia de esta partida en el gasto público local (AIReF, s. f.).

Sin embargo, España continúa enfrentando dificultades para alcanzar los objetivos marcados por la Unión Europea. Entre 2010 y 2020, la generación de residuos municipales se redujo un 7,5%, frente al objetivo del 10%, y el porcentaje de residuos preparados para la reutilización y el reciclado alcanzó el 40,5% en 2020, lejos del 50% exigido. Además, la Comisión Europea ha advertido sobre el riesgo de no cumplir los objetivos previstos para 2025, 2030 y 2035 (AIReF, s. f.).

El informe también subraya la necesidad de reforzar los mecanismos de control y supervisión, así como la importancia de avanzar en la digitalización y la transparencia para mejorar la eficacia y la eficiencia de la gestión pública de residuos. Asimismo, destaca la heterogeneidad en el cumplimiento de los objetivos entre comunidades autónomas y la importancia de avanzar hacia modelos de gestión más coordinados y transparentes (AIReF, s. f.).

En este contexto, la digitalización emerge como una solución prioritaria. El uso de herramientas digitales con funciones de geolocalización, asignación de rutas y gestión

ciudadana directa contribuye a reducir los kilómetros recorridos por los vehículos de recogida, disminuyendo el gasto en combustible, mantenimiento y personal. Según estudios de buenas prácticas recogidos en documentos como la Comunicación COM/2020/98 final de la Comisión Europea y otros informes técnicos, estas mejoras pueden suponer un ahorro estimado de entre un 10% y un 30% de los costes logísticos (ES ES 66 final COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Una Estrategia Europea de Datos, s. f.).

En conclusión, la digitalización, junto con el uso de herramientas tecnológicas como la aplicación propuesta, refuerza la viabilidad económica y la sostenibilidad de la gestión de residuos municipales, mejorando la transparencia, la eficiencia y el vínculo entre ciudadanía y administración.

6.2 POSIBLES FUENTES DE FINANCIACIÓN

El proyecto se enmarca en los objetivos estratégicos del Plan de Acción para la Economía Circular España 2030 y, por tanto, es susceptible de recibir financiación pública. Asimismo, los programas europeos LIFE y Horizon Europe promueven activamente la financiación de tecnologías que mejoren la sostenibilidad urbana, especialmente en el ámbito de los residuos. El programa URBACT, por su parte, fomenta el intercambio de buenas prácticas y la cooperación entre ciudades, lo que puede facilitar la implementación y difusión de soluciones innovadoras.

Desde el punto de vista ambiental y normativo, la iniciativa se alinea con los objetivos de reciclaje establecidos por la UE (55 % en 2025, 60 % en 2030 y 65 % en 2035 para residuos municipales, según la Directiva (UE) 2018/851 (Del Estado, 2018), reduciendo los costes por incumplimiento normativo que podrían suponer sanciones para las administraciones locales. Además, al promover una gestión transparente, participativa y basada en datos, la aplicación fortalece el vínculo entre ciudadanía y administración, generando un retorno social positivo que justifica la inversión inicial desde una perspectiva de eficiencia en el gasto público.

6.3 ANÁLISIS VAR Y TIR

Para garantizar una evaluación integral de la viabilidad del proyecto de desarrollo e implementación de la aplicación móvil, resulta imprescindible realizar un análisis económico que permita determinar la rentabilidad y sostenibilidad financiera de la inversión. En este sentido, se llevará a cabo un estudio detallado basado en dos indicadores financieros fundamentales: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El análisis del VAN permitirá calcular el valor presente de los flujos de caja futuros asociados al proyecto, descontando los costos y beneficios para determinar si la inversión genera un valor positivo para los entes involucrados. Por su parte, la TIR ofrecerá una tasa porcentual que indica la rentabilidad esperada del proyecto, facilitando la comparación con otras alternativas de inversión y con el costo de oportunidad del capital.

De este modo, se podrá validar que la aplicación móvil estudiado no es solo viable técnicamente como hemos visto anteriormente, sino que también puede ser beneficiosa económicamente.

Supuestos del modelo financiero

Para justificar el valor de la inversión inicial para desarrollar el proyecto, que ha sido cedido por la empresa colaboradora, vamos a necesitar saber el salario, la duración, el coste total y el coste semanal por cada rol, por ello se han estimado estos costes:

Rol	Salario mensual	Dedicación media total	Coste total (7 meses)	Coste semanal
Product Owner	4.600 €	20%	6.440 €	210,00 €
Scrum Master	4.500 €	20%	6.300 €	200,00 €
Consultor Smart City	5.000 €	25%	8.750 €	287,50 €
Desarrollador 1	3.500 €	100%	20.416,67 €	687,50 €

Rol	Salario mensual	Dedicación media total	Coste total (7 meses)	Coste semanal
Desarrollador 2	3.500 €	100%	20.416,67 €	687,50 €
TOTAL, medio semanal	—	—	62.323,34 €	2.225,84 €

TABLA 9. COSTES DEL PERSONAL

(Fuente: Elaboración propia)

- Coste indirecto semanal (infraestructura, licencias, contingencias) = **274,16 €**.
- Total proyecto por semana: **2.500 €/sem.**
- Total del proyecto: **70.000 €** (28 sem × 2.500 €/sem).

Para realizar los cálculos se han considerado los siguientes supuestos (los datos han sido suministrados por la empresa tecnológica colaboradora que ha estimado estas cifras para una futura implantación):

- Precio de venta por cliente (ayuntamiento): 15.000 €.
- Clientes potenciales (ayuntamientos): 160.
- Escenarios considerados: Optimista (20%), Normal (10%), Pesimista (5%).
- Ingresos anuales esperados: según número de ayuntamientos por escenario.
- Costes fijos anuales: 50.000 € (gastos de mantenimiento e innovación)
- Inversión inicial (año 0) :70.000 €, justificada en los gastos del personal.
- Horizonte del proyecto: 5 años.
- Tasa de descuento usada para VAN: 10% (tasa mínima aceptable o coste de oportunidad).

VAN

Se plantea una estimación bajo tres escenarios: *optimista*, *normal* y *pesimista*. En cada uno, se proyecta un número diferente de ventas anuales según el porcentaje del total de clientes potenciales.

ESCENARIO OPTIMISTA

El número de clientes que tendremos en el escenario optimista será el 20% de 160 = 32, a partir de este dato, podremos calcular el flujo de caja (Cash Flow).

Año	Nº Clientes	Ingresos (15.000 × Nº clientes)	Costes Fijos	Flujo Neto
0	0	0€	0€	-70.000€
1	6	90.000€	50.000€	40.000€
2	12	180.000€	50.000€	130.000€
3	18	270.000€	50.000€	220.000€
4	24	360.000€	50.000€	310.000€
5	32	480.000€	50.000€	430.000€

TABLA 10. ESCENARIO OPTIMISTA CASH FLOW

(Fuente: Elaboración propia)

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Flujo_t}{(1+r)^t} - I$$

Donde:

$Flujo$ = Flujo neto en el año t

r = tasa de descuento (en este caso, $4\%=0,04$).

n = 5 años.

I = inversión inicial (70.000)

Sustituimos:

1. Año 1:

$$\frac{40.000}{(1 + 0,04)^1} = 38.461,54$$

2. Año 2

$$\frac{130.000}{(1 + 0,04)^2} = 120.216,76$$

3. Año 3:

$$\frac{220.000}{(1 + 0,04)^3} = 195.686,6$$

4. Año 4:

$$\frac{310.000}{(1 + 0,04)^4} = 265.128,02$$

5. Año 5:

$$\frac{430.000}{(1 + 0,04)^5} = 353.818,67$$

Suma de flujos:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^5 \frac{Flujo_t}{(1 + 0.04)^t} \\ &= 38.461,54 + 120.216,76 + 195.686,60 + 265.128,02 + 353.818,67 \\ &= 973.311,59 \end{aligned}$$

VAN final

$$\text{VAN} = \text{Suma de flujos} - I = 973.311,59 - 70.000 = 903.311,59$$

$$\text{VAN} = 430.000 \times 3,790786769 - 70.000 = \mathbf{1.560.038,31\text{€}}$$

ESCENARIO NORMAL

El número de clientes que tendremos en el escenario normal será el 10% de 160 = 16, a partir de este dato, podremos calcular el flujo de caja (Cash Flow).

Año	Nº Clientes	Ingresos (15.000 × Nº clientes)	Costes Fijos	Flujo Neto
0	0	0€	0€	-70.000€
1	3	45.000€	50.000€	-5.000€
2	7	105.000€	50.000€	55.000€
3	10	150.000€	50.000€	100.000€
4	13	195.000€	50.000€	145.000€
5	16	240.000€	50.000€	190.000€

TABLA 11. ESCENARIO NORMAL CASH FLOW

(Fuente: Elaboración propia)

1. Año 1:

$$\frac{-5.000}{(1 + 0,04)^1} = -4.807,69$$

2. Año 2

$$\frac{55.000}{(1 + 0,04)^2} = 50.850,58$$

3. Año 3:

$$\frac{100.000}{(1 + 0,04)^3} = 88.899,60$$

4. Año 4:

$$\frac{145.000}{(1 + 0,04)^4} = 123.946,58$$

5. Año 5:

$$\frac{190.000}{(1 + 0,04)^5} = 156.166,13$$

Suma de flujos:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^5 \frac{Flujo_t}{(1 + 0.04)^t} \\ &= -4.807,69 + 50.850,58 + 88.899,60 + 123.946,58 + 156.166,13 \\ &= 415.055,3 \end{aligned}$$

$$VAN = \text{Suma de flujos} - I = 415.055,3 - 70.000 = 345.055,3€$$

ESCENARIO PESIMISTA

El número de clientes que tendremos en el escenario normal será el 5% de 160 = 8, a partir de este dato, podremos calcular el flujo de caja (Cash Flow).

Año	Nº Clientes	Ingresos (15.000 × 8)	Costes Fijos	Flujo Neto
0	0	0€	0€	-70.000€
1	1	15.000€	50.000€	-35.000€
2	2	30.000€	50.000€	-20.000€
3	4	60.000€	50.000€	10.000€
4	6	90.000€	50.000€	40.000€
5	8	120.000€	50.000€	70.000€

TABLA 12. ESCENARIO PESIMISTA CASH FLOW

(Fuente: Elaboración propia)

1. Año 1:

$$\frac{-35.000}{(1 + 0,04)^1} = -33.653,85$$

2. Año 2

$$\frac{-20.000}{(1 + 0,04)^2} = -18.491,12$$

3. Año 3:

$$\frac{10.000}{(1 + 0,04)^3} = 8.899,96$$

4. Año 4:

$$\frac{40.000}{(1 + 0,04)^4} = 34.192,16$$

5. Año 5:

$$\frac{70.000}{(1 + 0,04)^5} = 57.534,89$$

Suma de flujos:

$$\sum_{t=1}^5 \frac{Flujo_t}{(1 + 0.04)^t} = -33.653,85 + -18.491,12 + 8.899,96 + 34.192,16 + 57.534,89$$

$$= 48.471,04$$

$$\mathbf{VAN = Suma de flujos - I = 48.471,04 - 70.000 = -21.528.96€}$$

Por lo tanto, el VAN obtenido para cada uno de los escenarios es:

Escenario	VAN (€)
Optimista	903.311,59 €
Normal	345.055,3€ €
Pesimista	-21.528,96 €

TABLA 13. VAN TODOS LOS ESCENARIOS

(Fuente: Elaboración propia)

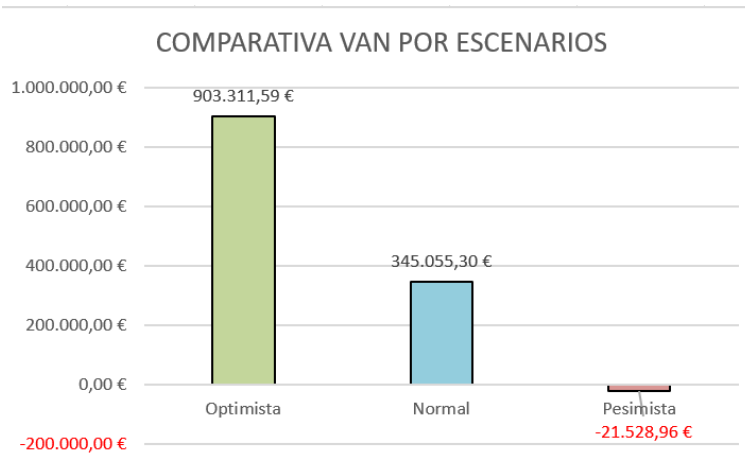


FIGURA 4. COMPARACIÓN DEL VAN POR ESCENARIOS

(Fuente: Elaboración propia)

CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL VAN

Tras realizar el análisis financiero del proyecto, se puede observar que los resultados reflejan una viabilidad económica favorable en la mayoría de los escenarios considerados, lo que evidencia el potencial del proyecto para generar valor económico y constituir una opción financiera interesante para su futura puesta en marcha.

Los resultados obtenidos permiten interpretar distintas realidades de mercado:

- El escenario optimista, muestra una rentabilidad muy elevada, lo que evidencia la gran escalabilidad del proyecto y su capacidad para generar retornos significativos.
- En el escenario normal, el valor sigue siendo positivo, lo que sugiere que incluso bajo condiciones realistas, la inversión mantendría un margen de rentabilidad sólido, garantizando la recuperación del capital invertido.
- El escenario pesimista presenta un VAN ligeramente negativo, indicando que ante un contexto desfavorable el proyecto podría no alcanzar el umbral de rentabilidad. Sin embargo, la magnitud reducida de valor negativo demuestra que el proyecto es

altamente sensible a pequeñas mejoras, las cuales podrían fácilmente revertir el resultado y situar el VAN en valores positivos.

En términos cualitativos, estos resultados nos permiten concluir que:

- El proyecto genera valor económico en escenarios normales o favorables.
- Mantiene un nivel de riesgo asumible, incluso ante escenarios adversos.
- Presenta un potencial de rentabilidad alto y una sólida base para su futura implementación, especialmente si cuenta con apoyo público o subvenciones orientadas a la economía circular y digitalización

TIR (Tasa Interna de Retorno)

TIR es la tasa de interés que hace que:

$$VAN = 0 = \sum_{t=1}^5 \frac{F}{(1+i)^t} - 70.000$$

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se ha calculado para los tres escenarios previstos (optimista, normal y pesimista), con el objetivo de evaluar la rentabilidad del proyecto desde una perspectiva dinámica.

Para cada escenario, se ha construido una tabla con los flujos netos de caja anuales durante los cinco años del horizonte temporal del proyecto, incluyendo la inversión inicial (valor negativo en el año 0) y los ingresos netos anuales (positivos). El cálculo de la TIR se ha realizado mediante la función financiera de Excel denominada =TIR(), la cual permite determinar la tasa de descuento que iguala a cero el Valor Actual Neto (VAN), a partir de una serie de flujos de caja.

AÑO	OPTIMISTA	NORMAL	PESIMISTA
0	-70.000,00 €	-70.000,00 €	-70.000,00 €
1	40.000,00 €	-5.000,00 €	-35.000,00 €
2	130.000,00 €	55.000,00 €	-20.000,00 €
3	220.000,00 €	100.000,00 €	10.000,00 €
4	310.000,00 €	145.000,00 €	40.000,00 €
5	430.000,00 €	190.000,00 €	70.000,00 €
TIR	140%	68%	-1%

FIGURA 5. EXCEL DEL CALCULO DEL TIR

(Fuente: Elaboración propia)

La TIR se ha determinado de forma precisa utilizando Excel, lo que ha permitido obtener los resultados reflejados en la tabla resumen de indicadores económicos. Este método de cálculo es adecuado, reconocido y ampliamente utilizado en entornos profesionales y académicos, y permite evaluar con rigor la rentabilidad relativa del proyecto.

Escenario	TIR (%)
Optimista	140%
Normal	68%
Pesimista	-1%

TABLA 14. TIR DE TODOS LOS ESCENARIOS

(Fuente: Elaboración propia)

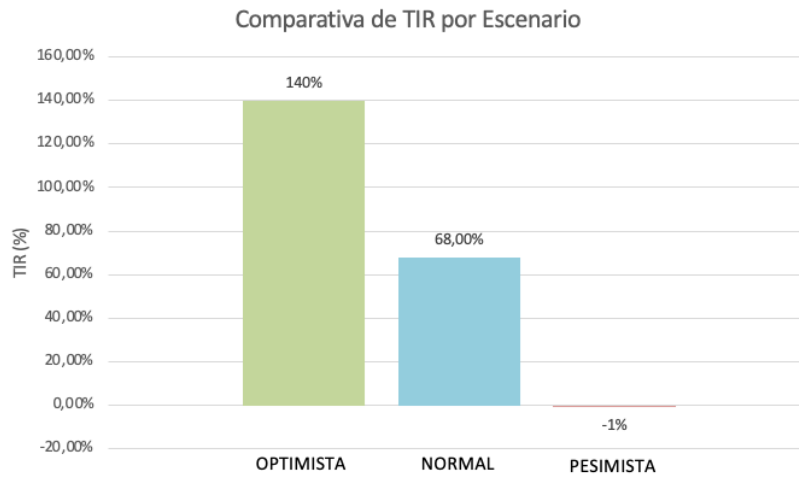


FIGURA 6. COMPARATIVA TIR POR ESCENARIOS

(Fuente: Elaboración propia)

CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL TIR

El análisis de la Tasa Interna de Retorno (TIR) aplicado al presente proyecto ha evidenciado una rentabilidad elevada en dos de los escenarios contemplados, normal y optimista, lo que constituye una señal clara de viabilidad financiera. Aunque en el escenario pesimista la TIR se sitúa en un valor cercano a cero (-1%), esta situación refleja únicamente la importancia de gestionar riesgos y estar preparados ante variaciones negativas en ingresos o costes.

En la mayoría de los casos, la TIR supera de forma muy significativa la tasa de corte establecida (10%), que representa el coste de oportunidad del capital o tasa mínima exigida para considerar un proyecto aceptable

Desde una perspectiva financiera, estos resultados reflejan una excelente capacidad del proyecto para remunerar el capital invertido, con márgenes amplios que proporcionan un elevado grado de resiliencia ante posibles variaciones en ingresos o costes. En consecuencia, se puede concluir que el proyecto podría ser rentable.

PAYBACK

Este indicador financiero va a determinar cuanto tiempo vamos a tardar en recuperar la inversión inicial en cada uno de los escenarios, midiendo así el riesgo financiero y la liquidez.

$$\text{Payback simple} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujo neto anual}}$$

Escenario	Inversión inicial (€)	Flujo neto anual (€)	Payback simple (años)
Optimista	70.000	430.000	0,16 (≈ 2 meses)
Normal	70.000	190.000	0,37 (≈ 4,5 meses)
Pesimista	70.000	70.000	1,00 (≈ 12 meses)

TABLA 15. PAYBACK

(Fuente: Elaboración propia)

El análisis del Payback confirma que el proyecto recupera la inversión inicial de 70.000 € en un periodo muy corto, incluso en el escenario pesimista, donde se alcanzaría en un año, demostrando la alta viabilidad económica del proyecto.

7 CONCLUSIÓN DEL PROYECTO

7.1 RESULTADOS PRINCIPALES

Finalizado el proyecto, podemos observar que se ha abordado con rigor el análisis de viabilidad técnica y económica de una aplicación móvil orientada a la gestión inteligente y sostenible de residuos en el contexto de las Smart Cities.

En primer lugar, la evaluación de la viabilidad técnica del proyecto confirma que la aplicación móvil propuesta es plenamente factible y escalable en el contexto de la gestión municipal de residuos urbanos. Esta conclusión se fundamenta en tres pilares clave:

Pilar	Evidencia	Impacto
Tecnología y arquitectura	Arquitectura modular basada en tecnologías existentes, integración con sistemas municipales.	Permite escalabilidad, mantenimiento ágil y reducción de costes de implantación
Innovación mediante IA	Estimación de peso y volumen de residuos a partir de imágenes, validada por estudios previos (Dalai & Senapati, 2017)	Evita la necesidad de sensores físicos, simplifica la infraestructura y asegura trazabilidad
Cumplimiento normativo	Ley 7/2022 de residuos, RGPD	Garantiza la seguridad de los datos, la privacidad de los usuarios y la alineación con el sistema de pago por generación.

TABLA 16. CONCLUSIÓN ESTUDIO TÉCNICO

(Fuente: Elaboración propia)

La combinación de tecnologías probadas, maduras y accesibles, IA para el cálculo de residuos, y el cumplimiento normativo, asegura que la solución es técnicamente viable, escalable y segura.

Esto permite afirmar que el proyecto es implementable en entornos municipales reales, ofreciendo un modelo innovador, eficiente y alineado con los objetivos de las Smart Cities.

Por otro lado, el análisis económico permitió evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto bajo diferentes escenarios de mercado —optimista, normal y pesimista— a través de métricas clave como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback:

Escenario	VAN (€)	TIR (%)	Payback simple
Optimista	903.311,59 €	140%	0,16 años (\approx 2 meses)
Normal	345.055,30 €	68%	0,37 años (\approx 4,5 meses)
Pesimista	-21.528,96 €	-1%	1 año (12 meses)

TABLA 17. CONCLUSIÓN ESTUDIO ECONÓMICO

(Fuente: Elaboración propia)

Los datos que se obtuvieron demuestran que la propuesta presenta una elevada rentabilidad y una recuperación de la inversión en plazos muy cortos en los escenarios optimista y normal, con TIR superiores al coste de capital esperado y VAN positivos lo que valida la conveniencia económica del proyecto.

Incluso bajo un escenario pesimista, en el que el Van resulta negativo y la TIR es -1%, el modelo mantiene una estabilidad razonable con una recuperación de lo invertido en

solo un año, mostrando que con ajustes mínimos en los costes operativos o en la estrategia de adopción podría recuperar su equilibrio financiero.

Esto implica que la aplicación no solo es económicamente viable a corto plazo, sino que su rentabilidad acumulada a medio plazo la convierte en una inversión de bajo riesgo y alto impacto social.

Además, desde una perspectiva estratégica, los resultados financieros refuerzan la viabilidad global del proyecto, demostrando que la digitalización de la gestión de residuos, cuando se apoya en un modelo tecnológico eficiente y normativamente sólido, puede generar valor económico y social sostenido, alineado con los principios de la economía circular y las Smart Cities sostenibles.

En conjunto, la propuesta tecnológica representa una herramienta innovadora que responde a los retos actuales en la gestión de residuos urbanos, promoviendo la eficiencia operativa, la responsabilidad ciudadana y la sostenibilidad ambiental. Además, impulsa la modernización de las administraciones públicas municipales, facilitando la implantación de sistemas de tarificación por generación que incentivarán la reducción, reutilización y reciclaje de residuos favoreciendo la participación y la conciencia social, elementos clave para el éxito de las Smart Cities.

7.2 LÍNEAS FUTURAS

Dada la naturaleza tecnológica y escalable de la propuesta, podemos destacar algunas oportunidades significativas de mejora y expansión, que permitirían aumentar su eficiencia, alcance y sostenibilidad en contextos reales y futuros.

Línea futura	Fundamentación y beneficios
<p>Desarrollo del prototipo funcional completo (MVP)</p>	<p>La creación de un Producto Mínimo Viable (prototipo funcional básico) permitirá realizar pruebas piloto en entornos reales, calibrar los algoritmos de IA y validar la experiencia de usuario, asegurando que la aplicación cumpla con las necesidades municipales y ciudadanas antes de su despliegue masivo.</p>
<p>Integración con sistemas IoT y blockchain</p>	<p>El IoT permite recopilar datos en tiempo real desde contenedores, sensores y vehículos de recogida, optimizando la logística y la planificación. La blockchain asegura transparencia y trazabilidad, evitando alteraciones de la información y reforzando la confianza de la ciudadanía en el sistema de gestión de residuos.</p>
<p>Optimización mediante análisis predictivo (Machine Learning)</p>	<p>El uso de algoritmos de aprendizaje automático permite anticipar patrones de generación de residuos, ajustar rutas de recogida y mejorar la eficiencia operativa, contribuyendo a una gestión más precisa y sostenible de los recursos municipales.</p>
<p>Estudio comparativo intermunicipal</p>	<p>Evaluar la adopción de la app en distintos municipios permite identificar factores socioeconómicos, culturales y geográficos que influyen en su uso, facilitando ajustes para una adaptación flexible y escalable en diversos contextos urbanos que presenten mayores niveles de problemas o falta de compromiso/uso.</p>
<p>Expansión a otras áreas urbanas inteligentes</p>	<p>El modelo y la infraestructura tecnológica pueden aplicarse a la gestión del agua, energía o movilidad urbana, replicando los principios de digitalización, trazabilidad y participación ciudadana, y consolidando un ecosistema de Smart City integral y sostenible.</p>

TABLA 18. POSIBLES LÍNEAS FUTURAS

(Fuente: Elaboración propia)

Estas líneas propuestas no solo garantizan la continuidad investigadora del proyecto, sino que abren camino hacia una transformación integral de los servicios de gestión pública, basadas en datos, eficiencia y sostenibilidad.

8 REFERENCIAS

- AIReF. (s. f.). *AIReF. Spending Review. Estudio sobre gestión de residuos municipales. Junio 2023*. www.airef.es
- Batllell, M., & Hanf, K. (2008). The fairness of PAYT systems: Some guidelines for decision-makers. *Waste Management*, 28(12), 2793-2800. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2008.02.031>
- Bel, G., & Gradus, R. (2016). Effects of unit-based pricing on household waste collection demand: A meta-regression analysis. *Resource and Energy Economics*, 44, 169-182. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2016.03.003>
- Boyd Cohen. (2016). *The Emergence of the Urban Entrepreneur: How the Growth of Cities and the Sharing Economy Are Driving a New Breed of Innovators*.
- Cadavid, A. N., Daniel Fernández Martínez, J., & Morales Vélez, J. (s. f.). *Revisión de metodologías ágiles para el desarrollo de software A review of agile methodologies for software development*.
- Dahlén, L., & Lagerkvist, A. (2010). Pay as you throw: Strengths and weaknesses of weight-based billing in household waste collection systems in Sweden. *Waste Management*, 30(1), 23-31. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.09.022>
- Dalai, R., & Senapati, K. K. (2017). Weight Estimation through Image Analysis. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 49. <http://www.ijctjournal.org>
- Del Estado, J. (2018). *Disposición 16673 del BOE núm. 294 de 2018*. <http://www.boe.es>
- Del Estado, J. (2022a). *Disposición 5809 del BOE núm. 85 de 2022*. <https://www.boe.es>
- Del Estado, J. (2022b). *Disposición 5809 del BOE núm. 85 de 2022*. <https://www.boe.es>
- Dijkgraaf, E., & Gradus, R. H. J. M. (2004). Cost savings in unit-based pricing of household waste: The case of The Netherlands. *Resource and Energy Economics*, 26(4), 353-371. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2004.01.001>
- Directiva (UE) 2018/ 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.* (s. f.).
- ES ES 66 final COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Una Estrategia Europea de Datos.* (s. f.).
- Fragoso-Martínez, F. J., & Rivera-Fernández, G. (2025). Challenges and solutions in the implementation of the new municipal waste fee in Spain: A critical and economic analysis of Law 7/2022. *Revista de Estudios de la Administración Local y Autonómica*, 2025-April(23), 29-59. <https://doi.org/10.24965/reala.11494>
- Jhanina, N., Elizabeth, E., & Ximena, D. (2024). Comparison of agile methodologies for software development Comparación de metodologías ágiles para el desarrollo de software Autores. *Journal Scientific MQRInvestigar*, 8(1), 5052-5074. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.1.2024.4985-5052-5074>
- José, J., & García, P. (s. f.). *The transformative impact of Act 7/2022, of April 8th, on waste and contaminated soils for a circular economy in the municipal management of waste of local competence*.
- José, J., García, P., & Sánchez González, J. (s. f.). *Fundación Democracia y Gobierno Local 76 QDL 65 · Cuadernos de Derecho Local*.

- Khurana, H. (s. f.). *Agile: The Necessitate Of Contemporary Software Developers*.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. En *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 127, pp. 221-232). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- López Gil, A. (2018). *Estudio comparativo de metodologías tradicionales y ágiles para proyectos de Desarrollo de Software*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/32875>
- Puig Ventosa, I. (s. f.). *Incentivos económicos para avanzar hacia INCENTIVOS ECONÓMICOS PARA AVANZAR HACIA LA REDUCCIÓN Y EL RECICLAJE DE RESIDUOS URBANOS*.
Reciclos | Ecoembes. (s. f.). Recuperado 5 de octubre de 2025, de <https://www.ecoembes.com/es/el-proceso-del-reciclaje-de-envases/reciclos>
- 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). (s. f.).
- Romano, G., & Masserini, L. (2023). Pay-as-you-throw tariff and sustainable urban waste management: An empirical analysis of relevant effects. *Journal of Environmental Management*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119211>
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum Guide The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*.

ANEXO I: Diagramas de flujo de la aplicación

Para representar de forma clara el funcionamiento general de la aplicación móvil, se han elaborado dos diagramas de flujo diferenciados: uno externo, orientado al usuario final, y otro interno, enfocado en la gestión administrativa por parte del ayuntamiento.

El diagrama de flujo externo muestra las principales interacciones que puede realizar el ciudadano a través de la aplicación, como el escaneo de residuos, la visualización de su historial de reciclaje o la consulta de su contribución a la tasa PAYT. Este flujo refleja la experiencia de usuario y su papel activo en el sistema de reciclaje.

Por otro lado, el diagrama de flujo interno representa los procesos que gestiona el ayuntamiento a partir de los datos recogidos por la app. En él se detalla cómo se recopilan, procesan y analizan los datos de reciclaje para calcular la tasa de residuos personalizada de cada usuario conforme a los principios del sistema PxG. Este flujo interno es clave para asegurar la trazabilidad, transparencia y eficiencia del modelo tarifario propuesto.

La distinción entre ambos diagramas permite comprender mejor cómo se articula la solución tecnológica tanto desde la perspectiva del ciudadano como desde el ámbito institucional.

DIAGRAMA DE FLUJO INTERNO

FIGURA 7. DIAGRAMA INTERNO DE LA APLICACIÓN

(fuente: elaboración propia)

EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO INTERNO

1. Inicio de sesión del Ayuntamiento

El sistema requiere acceso autenticado mediante credenciales del Ayuntamiento para garantizar que solo personal autorizado pueda consultar y operar sobre los datos sensibles de los ciudadanos. El personal técnico municipal accede al sistema mediante credenciales seguras, garantizando el cumplimiento de la normativa sobre protección de datos (Reglamento General de Protección de Datos, UE 2016/679).

- Si las credenciales son válidas → acceso al Panel principal.
- Si las credenciales **NO** son válidas → el sistema deniega el acceso y muestra un error; se registra el intento.

2. Panel municipal.

Una vez iniciado el sistema, el operador accede a:

- Buscar/seleccionar un hogar (por dirección / ID / nombre de conviviente).
- Visualizar reportes y estadísticas municipales.
- Acceder a la intervención manual (editar en caso de error o incidencia: registros, ajustar kilos, agregar notas).

El operador selecciona Buscar hogar para iniciar la revisión de un domicilio determinado.

3. Selección del hogar y consulta del padrón.

El sistema muestra los datos del hogar seleccionado (dirección, convivencia, historial de reciclaje).

A continuación, realiza la comprobación automática con el padrón municipal:

Pregunta: “¿Todos los convivientes están empadronados en el mismo domicilio?”

- Si **NO** están empadronados en el mismo lugar: El sistema genera una incidencia automática, muestra un aviso al operador y bloquea el cálculo de la tasa:

Ejemplo de mensaje:

“Incidencia: discrepancia en el padrón. No se calculará la tasa hasta su revisión.”

El expediente queda marcado como pendiente de documentación o revisión manual.

- Si **SÍ** están correctamente empadronados: El sistema continúa al siguiente paso: la revisión del historial de reciclaje del hogar.

4. Revisión del historial de reciclaje.

Se muestra el registro histórico de las actividades de reciclaje de los convivientes:

- Tipo de residuo (orgánico, envases, papel, vidrio).
- Fecha y hora de la entrega.
- Peso o volumen estimado.
- Evidencia asociada (fotografía y QR del contenedor).

Ejemplo de registro: “Conviviente: Marta López. Fecha: 14/09/2025, 18:34h. Tipo: envases. Peso estimado: 1,3 kg. QR contenedor: ZONA_03.”

Estos datos permiten al Ayuntamiento comprobar la trazabilidad de cada acción y la participación del hogar en la recogida selectiva.

5. Validación con modelos de IA.

Cada registro se somete a una verificación por inteligencia artificial (IA):

- Analiza la imagen de la bolsa y detecta si el contenido coincide con el tipo de residuo declarado.
- Comprueba que el QR del contenedor pertenece a la zona correcta.
- Evalúa la coherencia con patrones previos (por ejemplo, frecuencia o ubicación habitual).

Decisión: ¿La verificación es correcta?

- Si **SÍ:** el sistema marca la acción como “verificada” y la suma al total de residuos reciclados.

Ejemplo de mensaje interno: “Verificación correcta: residuo clasificado como orgánico. Peso estimado: 1,2 kg.”

- Si **NO:** el sistema activa una reclasificación automática.

6. Reclasificación automática

La IA intenta identificar correctamente el residuo aplicando un modelo más flexible.

Decisión: ¿Ha logrado clasificar el residuo con seguridad suficiente?

- Si **SÍ**: el sistema actualiza la clasificación y marca el registro como “verificado (IA reclasificación)”.

Ejemplo: “Residuo reclasificado: de envases a papel/cartón (confianza 92%).”

- Si **NO**: se marca como “no reciclado” y se remite a revisión manual.

Ejemplo: “Registro no verificado: tipo de residuo no reconocido. Enviado a revisión manual.”

7. Intervención manual del operador municipal.

Si la IA no resuelve la discrepancia, el operador revisa manualmente la imagen, el QR y los datos.

Puede:

- Ajustar el peso del residuo.
- Modificar la categoría del residuo.
- Añadir notas internas.
- Marcar el registro como “verificado” o “no reciclado”.

Ejemplo de actuación: “Operador J.L. — 15/09/2025 — Verifica registro manualmente. Se confirma que el residuo era vidrio. Peso ajustado a 2,0 kg.”

El sistema guarda esta intervención para garantizar trazabilidad.

8. Almacenamiento y consolidación de datos.

Después de procesar todos los registros, el sistema consolida la información por hogar:

- Kg totales generados.
 - Kg reciclados correctamente.
 - Kg no reciclados.
 - Incidencias o notas abiertas.

Estos datos servirán para el cálculo posterior de la tasa PAYT.

9. Verificación previa al cálculo

Pregunta: ¿Hay incidencias sin resolver?

- **Si SÍ:** se suspende el cálculo de la tasa hasta que se corrijan.

Ejemplo: “Pendiente de resolución de incidencia #0547. No calcular tasa.”

- **Si NO:** el sistema pasa al cálculo de la tasa PxG.

10. Cálculo de la tasa PxG

El cálculo se realizaría aplicando la fórmula:

$$TASA = (kg_{totales} - kg_{reciclados}) \times factor_{penalización}$$

Ejemplo práctico:

Hogar: C/ López Rueda,6.

Kg totales: 80 kg / Kg reciclados: 50 kg / Factor penalización: 0,20 €/kg

Resultado: $(80 - 50) \times 0,20 = 6,6 \text{ €}$

El sistema genera un informe detallado con todos los datos y registros que sustentan el cálculo.

11. Control de incongruencias o fraude

Decisión: ¿Se detectan irregularidades?

- Si **NO**: la tasa se registra en el expediente del hogar.
- Si **SÍ** (por ejemplo, intentos de manipulación o falsas evidencias): se abre un expediente sancionador.

Ejemplo: “Incumplimiento detectado: QR no válido o reutilizado. Se inicia expediente sancionador #1245.”

12. Apertura y gestión del expediente sancionador

El expediente sancionador se remite al área técnico-jurídica del Ayuntamiento para su evaluación.

Decisión: ¿La sanción se confirma tras la revisión?

- Si **NO**: se archiva el expediente y se continúa con el registro normal de la tasa.
- Si **SÍ**: se notifica formalmente al ciudadano.

Ejemplo:

“Se ha confirmado una infracción relacionada con el uso incorrecto del sistema de reciclaje municipal. Se aplicará una sanción conforme a la ordenanza vigente.”

13. Notificación al ciudadano y emisión de recibo

El sistema envía automáticamente una notificación al ciudadano con:

- El importe final de su tasa.

- Explicación del cálculo (kg totales, reciclados, penalización aplicada).
- Recomendaciones para mejorar su comportamiento ambiental.

Ejemplo de mensaje al ciudadano: “Resumen mensual: Has reciclado correctamente el 65% de tus residuos. Tu tasa correspondiente al mes de septiembre es de 6,6 €. Recicla más para reducir tu tasa el próximo mes.”

14. Registro y archivo en expediente municipal

Todos los datos quedan registrados en el expediente del hogar, incluyendo los cálculos, incidencias, revisiones manuales, sanciones (si las hay) y notificaciones enviadas. Esto garantiza trazabilidad completa y cumplimiento de la normativa de protección de datos.

15. Retroalimentación de la IA

Los registros verificados sirven para reentrenar el modelo de IA. Cuantas más imágenes y casos se procesan, mayor es la precisión del sistema para reconocer residuos en el futuro.

16. Generación de reportes municipales

El sistema genera reportes con indicadores agregados:

- Por zonas, rutas o barrios.
- Por tipo de residuo.
- Por nivel de participación ciudadana.

Ejemplo de gráfico: “Zona Centro: 71% de reciclaje correcto. Zona Norte: 58%. Zona Sur: 83%.”

Estos informes sirven de base para decisiones estratégicas y campañas de concienciación.

17. Cierre del ciclo y mejora continua

Con los datos obtenidos, el Ayuntamiento puede:

- Ajustar los factores de cálculo de la tasa.
- Planificar campañas educativas.
- Optimizar las rutas de recogida.
- Evaluar el impacto de las medidas PAYT.

El sistema completa así un ciclo de retroalimentación inteligente, donde los resultados de cada periodo ayudan a mejorar el funcionamiento general y la participación ciudadana en el siguiente.

DIAGRAMA DE FLUJO EXTERNO

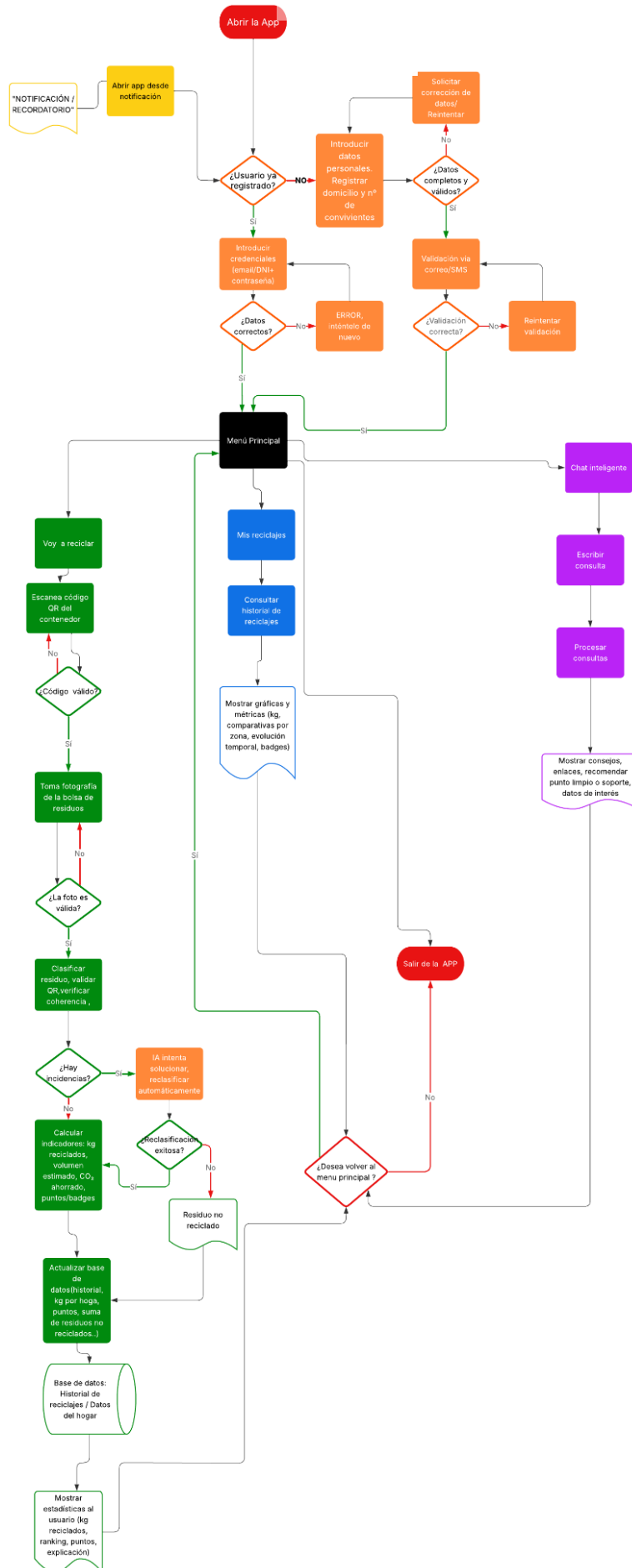


FIGURA 8. DIAGRAMA EXTERNO DE LA APLICACIÓN

(fuente: elaboración propia)

EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA

Apertura de la aplicación

El proceso se inicia cuando el ciudadano abre la aplicación. Si la apertura se produce desde una notificación o recordatorio (por ejemplo, un aviso de recogida o una alerta de reciclaje pendiente), el sistema redirige automáticamente a la pantalla correspondiente para facilitar la acción inmediata.

¿El usuario ya está registrado?

- Si es **SÍ**: se solicita introducir las credenciales (correo electrónico/DNI y contraseña).
- Si es **NO**: el sistema pide registrar los datos personales, domicilio y número de convivientes.

Una vez completado, se realiza una validación vía correo o SMS para verificar la identidad.

2. Validación de datos

- Si los datos están completos y la validación es correcta, el usuario puede continuar.
- Si los datos son incorrectos o incompletos, la app ofrece la opción de solicitar corrección o reintentar el proceso.

Esto garantiza que todos los registros se asocien a un domicilio real y correctamente identificado.

3. Inicio de sesión

Tras validar la identidad, el usuario accede al Menú Principal, que actúa como centro de operaciones de la aplicación. Desde aquí puede acceder a tres apartados principales:

1. **Voy a reciclar.**
2. **Mis reciclajes.**
3. **Chat inteligente.**

MÓDULO “VOY A RECICLAR”

Escanear código QR del contenedor

El proceso de reciclaje comienza con el escaneo del QR del contenedor.

- Si el código es válido, el sistema continúa.
- Si el código no es reconocido, se notifica el error y se solicita repetir la lectura.

Toma de fotografía de la bolsa de residuos

El usuario toma una foto de la bolsa que va a depositar.

- Si la foto es válida (visible, nítida y coherente con el tipo de residuo indicado), se envía al sistema.

- Si la foto no cumple los criterios, se solicita una nueva captura.

Clasificación automática mediante IA

La aplicación ejecuta un modelo de inteligencia artificial que analiza la fotografía y:

- Verifica si el tipo de residuo coincide con el contenedor escaneado.
- Comprueba la coherencia entre peso estimado, volumen y materiales detectados.

¿Hay incidencias?

- Si **NO** hay incidencias, el residuo se registra directamente como reciclado.
- Si **SÍ** hay incidencias, la IA intenta solucionarlas automáticamente (por ejemplo, reclasificar el residuo o corregir el tipo detectado).

¿Reclasificación exitosa?

- Si es **SÍ**, el residuo se marca como reciclado.
- Si es **NO**, se etiqueta como *residuo no reciclado* y se contabiliza en el registro correspondiente.

Cálculo de indicadores

El sistema actualiza en tiempo real las métricas del hogar:

- Kilogramos reciclados.
- Volumen estimado de residuos.

- CO₂ ahorrado.
- Puntos o recompensas ambientales.

Estos datos se almacenan en la base de datos del hogar, generando un historial verificable y trazable.

Visualización de resultados

El usuario puede consultar un resumen con:

- Estadísticas personales.
- Ranking o posición dentro de su zona.
- Explicaciones sobre cómo mejorar su puntuación.

MÓDULO “MIS RECICLAJES”

Desde este apartado, el usuario puede acceder a su historial completo de reciclajes.

El sistema muestra gráficas y métricas como:

- Evolución temporal (por semanas o meses).
- Comparativas con la media de su zona.
- Indicadores de mejora ambiental.

Este módulo fomenta la conciencia ecológica permite al ciudadano seguir su progreso individual.

MÓDULO “CHAT INTELIGENTE”

El usuario puede escribir consultas relacionadas con la gestión de residuos, dudas sobre separación o incidencias técnicas.

El asistente virtual procesa las preguntas y ofrece:

- Consejos personalizados.
- Enlaces a puntos limpios o centros de recogida.
- Información normativa y recomendaciones ambientales.

De esta manera, la app actúa también como un canal educativo y de comunicación directa con el sistema municipal.

4. ¿Desea volver al menú principal?

Al finalizar cualquiera de las acciones anteriores, el sistema pregunta si el usuario desea regresar al menú principal.

- Si es **SÍ**, se retorna a la pantalla inicial.
- Si es **NO**, el usuario puede cerrar la sesión y salir de la aplicación.

Estos flujos funcionales no solo buscan ser intuitivo para el usuario, sino que está alineado con los principios del sistema PxG permitiendo que el Ayuntamiento pueda recopilar datos reales sobre reciclaje individual y por hogar, lo que fomentaría un comportamiento ambientalmente responsable, mientras se ajusta la tasa de residuos de forma justa y personalizada.

