

04-021

PROPOSAL FOR A MOBILE SELECTIVE PLASTIC RECYCLING LINE FOR 3D PRINTING WITH FUSED DEPOSITION MODELLING

Cerezo-Narváez, Alberto (1); Alonso-García, María (1); Rodríguez-Blik, José Antonio (1); Otero-Mateo, Manuel (1); Pastor-Fernández, Andrés (1)

(1) Universidad de Cádiz

This research proposes a way to promote the management of plastic waste in the city of Cadiz, showing all the stages that compose the specific model of selective recycling of plastic, since a bottle is deposited in a container until a new element is made from 3D printing technology, for which a mobile exhibition is provided so that the public can observe the whole process. This mission comprises two domains. The technical dimension includes the mechanical process of plastic recycling, consisting of collection, selection, extrusion and printing, introducing 3D printing with fused deposition modelling, which transforms recycled plastic into consumable material. The environmental aspect is based on the transformation of technical data into achievable and simplified goals, to guide the population in the mission to avoid further filling the sea with plastic, creating a friendly recycling system, re-using the plastic that is generated on a daily basis. All the necessary elements of the exhibition are placed in two standard 20-foot, recycled, reconditioned and autonomous shipping containers, which, as part of an itinerant route, enable the promotion of citizen participation and collaborative economy.

Keywords: waste management; plastic recycling; 3D printing; fused deposition modelling; citizen participation

PROPUESTA DE LÍNEA MÓVIL DE RECICLAJE SELECTIVO DE PLÁSTICOS PARA IMPRESIÓN 3D CON MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Esta investigación plantea una vía para agilizar la gestión de residuos plásticos en la Ciudad de Cádiz, mostrando todas las etapas que componen el modelo específico de reciclaje selectivo de plásticos, desde el momento en que se deposita una botella en un contenedor hasta que se elabora un nuevo elemento a partir de tecnología de impresión 3D, para lo que sea crea un expositor itinerante en el que la ciudadanía pueda observar todo el proceso. Esta misión comprende dos ámbitos. El aspecto técnico incluye el proceso mecánico de reciclado de plásticos, compuesto por la recolección, selección, extrusión e impresión, introduciendo la impresión 3D con modelado por deposición fundida, que transforma el plástico reciclado en material consumible. El aspecto medioambiental está basado en la transformación de los datos técnicos en metas asequibles y simplificadas, para orientar a la población en la misión de evitar seguir llenando los mares de plástico, creando un sistema de reciclaje amigable, reutilizando el plástico que se genera día a día. Todos los elementos necesarios de la exposición se introducen en dos contenedores marítimos estándar de 20 pies, reciclados, reacondicionados y autosuficientes que, en régimen de itinerancia, permiten potenciar la participación ciudadana y promover la economía colaborativa.

Palabras clave: gestión de residuos; reciclaje de plásticos; impresión 3D; modelado por deposición fundida; participación ciudadana

Correspondencia: Alberto Cerezo-Narváez. Correo: alberto.cerezo@uca.es



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El reciclaje es tan básico que puede considerarse inherente a la supervivencia de la humanidad, con numerosos ejemplos a lo largo de la historia: reutilización de herramientas en los primeros asentamientos estables (Vaquero et al., 2012), recuperación de papiros en el Antiguo Egipto (Gaudet, 2019), construcción del Coloso de Rodas con placas de cobre y bronce recuperadas (Gnesin, 2013), pavimentación de calzadas romanas con vasijas cerámicas reutilizadas (Peña, 2020) o incluso transformación de latas de conserva en munición en las contiendas bélicas en la primera mitad del siglo XX (Todd, 2013). La escasez de esos materiales en el entorno, la imposibilidad económica de adquirirlos de nuevo o la complejidad de los procesos productivos para volver a crearlos han sido algunos de los motivos por los que reciclar en el pasado. No obstante, todos eran materiales extraídos de la naturaleza (madera, metales, papel, vidrio o cerámica, por ejemplo), por lo que tenían un proceso de reciclado sencillo o, si no se reciclaban, eran incinerados o alojados en vertederos, esperando a su descomposición (Stöger, 2014).

En el siglo XX, la creación de un material a partir de fibras sintéticas de polyester en 1929 (Feldman, 2008), el desarrollo del tereftalato de polietileno (PET) en 1941 (Porta, 2019) y, sobre todo, su autorización para comercializarse en contacto con alimentos en 1954 por la agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), supusieron un cambio de paradigma en la producción, distribución y comercialización de alimentos (Hawkins, 2012) reemplazando al papel, tela e incluso vidrio. El crecimiento de los envases de plástico ha sido exponencial (Geyer et al., 2017), pasando de 17 Mt a 381 Mt en 50 años (1965-2015). Este incremento de residuos plásticos va a seguir aumentando progresivamente (Lebreton & Andrady, 2019), debido al sistema actual de consumo de la sociedad en los núcleos urbanos (Wang et al., 2021) y crecimiento poblacional, generando una ingente cantidad de residuos que no podrán ser gestionados por los sistemas actuales, llegando a las 12.000 Mt en 2050 si se mantienen las tendencias actuales de producción y gestión de residuos. Este consumo desmesurado, unido a su difícil recuperación (Rigamonti et al., 2014), hace que la contaminación global de plásticos sea un problema de primer orden mundial (Bank et al., 2021) a corto, medio y largo plazo. Esto está provocando que los actores de la cadena de reciclaje se vean abocados a un reciclaje acelerado (Picuno et al., 2021), restando eficiencia al sistema. Esta ineficiencia se materializa actualmente, con la falta de optimización de rutas de recogida selectiva, la despreocupación por el compromiso ciudadano o la inexistencia de depósitos de proximidad, que hacen que sea mucho más cómodo para el usuario no reciclar. Para intentar corregir esta tendencia y mitigar el problema, España ha publicado la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Gobierno de España, 2022), que fortalece la prevención de residuos y la responsabilidad ampliada del productor de plásticos, incorporando las necesidades de su reutilización, reparación y reciclado, así como el desarrollo y promoción de materiales más sostenibles.

Uno de los problemas que se observan en la actualidad en relación con el reciclaje, radica en el desconocimiento del proceso de reciclaje por parte del ciudadano y la consecuente falta de confianza en el sistema (Pierini et al., 2021). Es por ello que, la concienciación sobre la importancia de la comunidad en la cadena de reciclaje se posiciona como uno de los puntos más importantes para fortalecer el compromiso de las personas con este proceso. En este contexto, cabe citar como ejemplos de participación organizacional el caso de la startup mexicana BioBox (<https://www.biobox.com.mx/>), que premia al ciudadano por reciclar mediante el uso de máquinas expendedoras de plástico y aluminio, de participación legislativa el sistema PFAND alemán (<https://einweg-mit-pfand.de/>), que impone un gravamen a las botellas de plástico que se retorna mediante el uso de máquinas RVM y de participación ciudadana la iniciativa Marea (<https://www.mareaplastic.uma.es/>), que fomenta la recolección, procesado y transformación del plástico.

2. Objetivos

Esta investigación propone una manera de agilizar la gestión de residuos plásticos de la ciudad de Cádiz, mostrando a sus habitantes todas las etapas que componen el modelo específico de reciclaje selectivo de plásticos, desde el momento en que se deposita una botella en su correspondiente contenedor hasta que se elabora un nuevo elemento a partir de tecnología de impresión 3D, promoviendo su participación. Para ello, se crea un expositor itinerante, para que los ciudadanos puedan observar in-situ todos los procesos. De esta forma, se pretende ofrecer una alternativa al sistema actual de reciclaje, presentando unos resultados que pueden ser replicados en otras ciudades, con nuevas tecnologías de producción autosuficientes que mejoran desde la proximidad la vida de los ciudadanos.

El proyecto tiene dos dimensiones: técnica y medioambiental. El aspecto técnico incluye desarrollar un proceso mecánico de reciclado de plásticos (recolección, selección, extrusión o impresión) e impresión 3D-FDM (Fused Deposition Modeling) portátil, itinerante y autónomo, que transforme el plástico en consumible. El aspecto medioambiental contempla crear un sistema amigable pero profusamente tecnológico, que fomente la participación ciudadana, usando los métodos que se tienen al alcance. El sistema se desarrolla creando un plan de metas de reciclaje, para conseguir el material suficiente con el que se pueda, mediante la tecnología descrita, crear elementos que mejoren el entorno de los ciudadanos, como alumbrado público, mobiliario urbano, parques infantiles o equipamiento deportivo, reutilizando el plástico que se genera día a día. Para llevar estos dos aspectos de la mano, todos los elementos habrán de ser introducidos en dos contenedores marítimos estándar de veinte pies, no aptos ya para el transporte, reciclados y reacondicionados.

3. Metodología

La metodología seguida es la investigación basada en el diseño (IBD), que favorece el desarrollo de soluciones innovadoras para resolver problemas reales, avanzando en la teoría (Lukka, 2003) al generar conocimiento mediante el desarrollo de soluciones innovadoras que resuelve un problema práctico (Holmström et al., 2009). La IBD tiene una fase descriptiva para una comprensión profunda del problema, que da paso a una fase prescriptiva (van Aken et al., 2016). La IBD es una metodología sistemática pero flexible, enfocada a mejorar la práctica en ingeniería mediante el análisis iterativo, diseño, desarrollo e implementación de productos basados en la colaboración en entornos reales, lo que conduce a su vez a teorías y principios de diseño sensibles con el contexto (March & Smith, 1995). El proceso de investigación comprende las siguientes etapas:

Análisis del marco contextual del reciclaje en el que se desarrolla el proyecto.

- Estudio de situación actual del reciclaje, analizando sus debilidades y oportunidades.
- Estudio de rutas de recogida y depósito de plástico reciclable en Cádiz.

Diseño de Línea Móvil de Reciclaje Selectivo (LMRS) de plásticos:

- Caracterización de elementos necesarios para el montaje de una LMRS de plásticos.
- Cálculo y dimensionado de las capacidades de una LMRS de plásticos.
- Definición de un entorno de producción, comprobando seguridad (modificación estructural), funcionalidad (proceso de reciclaje y fabricación) y autonomía energética (producción fotovoltaica y almacenamiento) y habitabilidad (acondicionamiento).
- Elaboración de modelos .STL para el catálogo de mobiliario urbano reproducible y archivo .GCODE con parámetros de laminación optimizados para su impresión.
- Elaboración de arte de DOSSIER de productos imprimibles para participación.

4. Análisis del marco contextual del reciclaje

En España, el sistema de reciclaje se realiza en cuatro contenedores diferentes: amarillo para envases y latas, verde para vidrio, azul para papel y cartón y gris para restos y orgánicos. Según las memorias anuales de generación y gestión de residuos de competencia municipal (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2019), los centros de clasificación de envases ligeros, a los que se destinan los residuos del contenedores amarillo y azul, gestionados por Ecoembes, recuperan sólo 2/3 del total de envases, gestionándose la diferencia en los centros de triaje y compostaje, a donde van a parar todos los residuos urbanos mezclados del contenedor gris. En Andalucía y en Cádiz, esta cantidad no llega al 50%, como muestra la Tabla 1. Estos datos reflejan que la concienciación del ciudadano medio andaluz (y gaditano) es todavía insuficiente.

Tabla 1. Plásticos gestionados en España, Andalucía y Cádiz según contenedor 2017-2019

Andalucía	Contenedor amarillo (t)			Contenedor gris (t)			Porcentaje amarillo-total		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
España	268043,2	301361,5	327281,9	142757,1	160077,1	177633,6	65,2%	65,3%	64,8%
Andalucía	41041,3	44116,2	48769,9	41336,0	44698,7	61428,6	49,8%	49,7%	44,3%
Cádiz	6433,9	6553,7	7234,7	7277,8	6748,3	7794,4	46,9%	49,3%	48,1%

El centro de recuperación y reciclaje que tiene adscrito la ciudad de Cádiz se sitúa en El Puerto de Santa María (CRR El Puerto), que gestiona toda la provincia de Cádiz, salvo la Mancomunidad del Campo de Gibraltar, Mancomunidad de la Sierra de Cádiz, Jerez de la Frontera y Arcos de la Frontera. A partir de la población de cada municipio, se estiman los residuos gestionados de la ciudad de Cádiz, como muestra la Tabla 2. A continuación, hay que estudiar la composición de los residuos derivados del contenedor amarillo, para determinar la cantidad de residuos PET. A partir del número de habitantes, la cantidad de residuos anuales generados y los porcentajes de tipología de residuos recogidos, extraídos de la declaración ambiental del CRR El Puerto (Urbaser, 2019), se concretan las cantidades anuales y diarias de residuos que se generan en Cádiz, como muestra la Tabla 3.

Tabla 2. Residuos del contenedor amarillo por población del CRR El Puerto 2017-2019

CRR El Puerto	Población			Residuos gestionados (t)		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019
11012 Cádiz	118.048	116.979	116.027	1.157,2	1.219,4	1.288,6
Total municipios gestionados	649.418	648.647	648.999	6.366,1	6.761,5	7.207,8

Tabla 3. Residuos a reciclar estimados para la ciudad de Cádiz 2017-2019

Residuos	Cantidades anuales (t)			Cantidades diarias (t)		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Residuos gestionados	1.157,2	1.219,4	1.288,6	3,21	3,34	3,53
Residuos rechazados	278,5	319,5	341,1	0,76	0,88	0,93
Residuos PET recuperados	270,3	279,6	296,5	0,74	0,77	0,81
Otros plásticos recuperados	608,4	620,3	651,0	1,67	1,70	1,78

5. Caso de estudio: Línea Móvil de Reciclaje Selectivo (LMRS)

La LMRS acerca los procesos del reciclaje selectivo, así como de plásticos la tecnología de impresión 3D a la sociedad, para que sea comprendida de una manera más efectiva, potenciando la participación ciudadana y situando la economía colaborativa y reaprovechamiento de los recursos en el debate sobre los pilares de la sociedad del futuro.

5.1. Itinerario de la LMRS

En relación con la distribución dentro de la ciudad de los residuos a reciclar, hay que tener en cuenta las diferencias en densidad de población entre las distintas zonas de Cádiz, así como los contenedores existentes en cada zona. La Figura 1 muestra los distritos censales de la ciudad, así como la localización de los contenedores amarillos (256 unidades).

Figura 1: Distribución de contenedores amarillos y distritos censales de Cádiz



Dividir el volumen de residuos a reciclar de la ciudad por el total de contenedores, no considera densidades de población ni la cercanía de los contenedores amarillos a la población. No obstante, si se distribuye la cantidad de residuos por habitante por las distintas secciones del censo municipal y por el número de contenedores amarillos, se obtiene la cantidad de residuos por contenedor y distrito (ver Tabla 2), evitando el sesgo anterior, lo que ayuda a determinar el área de acción de la LMRS. Los residuos PET generados por los distritos es muy desigual (los distritos 8, 9 y 10 colman el 84% del total de residuos a reciclar, pero sus contenedores están más vacíos debido a su mayor y mejor distribución). Esto provoca la necesidad de una alternancia de distritos en el itinerario, estimando la capacidad del sistema con un flujo constante, sin considerar fluctuaciones de población por temporada o festividades. La LMRS debe gestionar el volumen de residuos plásticos necesarios para extraer 15 kg de PET diarios (capacidad máxima de la peletizadora, cuello de botella de la línea). Esto define un radio de acción variable, según las medias extraídas para los contenedores cercanos a los puntos posibles del itinerario.

En relación con la movilidad de la LMRS, la utilización de 2 contenedores de 20 pies reciclados requiere estudiar los 30 emplazamientos que componen el itinerario del punto limpio móvil de Cádiz. Si se comparan estos puntos con los distritos, y se asocian contenedores y volúmenes de residuos, se obtienen los puntos potenciales de cada distrito con la superficie suficiente para alojar la LMRS. Para seleccionar los puntos óptimos, se descartan aquellos con ruta de llegada compleja, con poca maniobrabilidad para su instalación, con poco tránsito, o cercanos entre sí. Después de analizar cuáles son los puntos que cumplen con esos criterios (puntos verdes de la Figura 1), se seleccionan para el itinerario

los puntos ilustrados en la Figura 2, por su cercanía con una vía principal, desde la que realizar la carga y descarga de los contenedores, y situación en zonas con buena concurrencia. Asimismo, tras definir los puntos en los que se posiciona la LMRS, se establece su temporalidad, su capacidad de producción y estima el volumen de residuo en cada contenedor, como resume la Figura 2, según distrito y población, determinando su radio de acción (contenedores objeto de gestión de la LMRS).

Tabla 2. Residuos diarios estimados por distrito en Cádiz

Distrito	Contenedores	Residuos (kg)	PET (kg)	Residuos/Contenedor (kg)	PET/Contenedor (kg)
1	6	144,110	33,159	24,018	5,527
2	1	35,616	8,195	35,616	8,195
3	4	93,973	21,623	23,493	5,406
4	5	96,164	22,127	19,233	4,425
5	1	25,753	5,926	25,753	5,926
6	4	92,603	21,307	23,151	5,327
7	3	59,452	13,680	19,817	4,560
8	78	1050,137	241,631	13,463	3,098
9	74	847,397	194,982	11,451	2,635
10	80	1085,205	249,699	13,565	3,121
Total	256	3530,410	812,329	13,791	3,173

Figura 2: Puntos seleccionados del itinerario de la LMRS



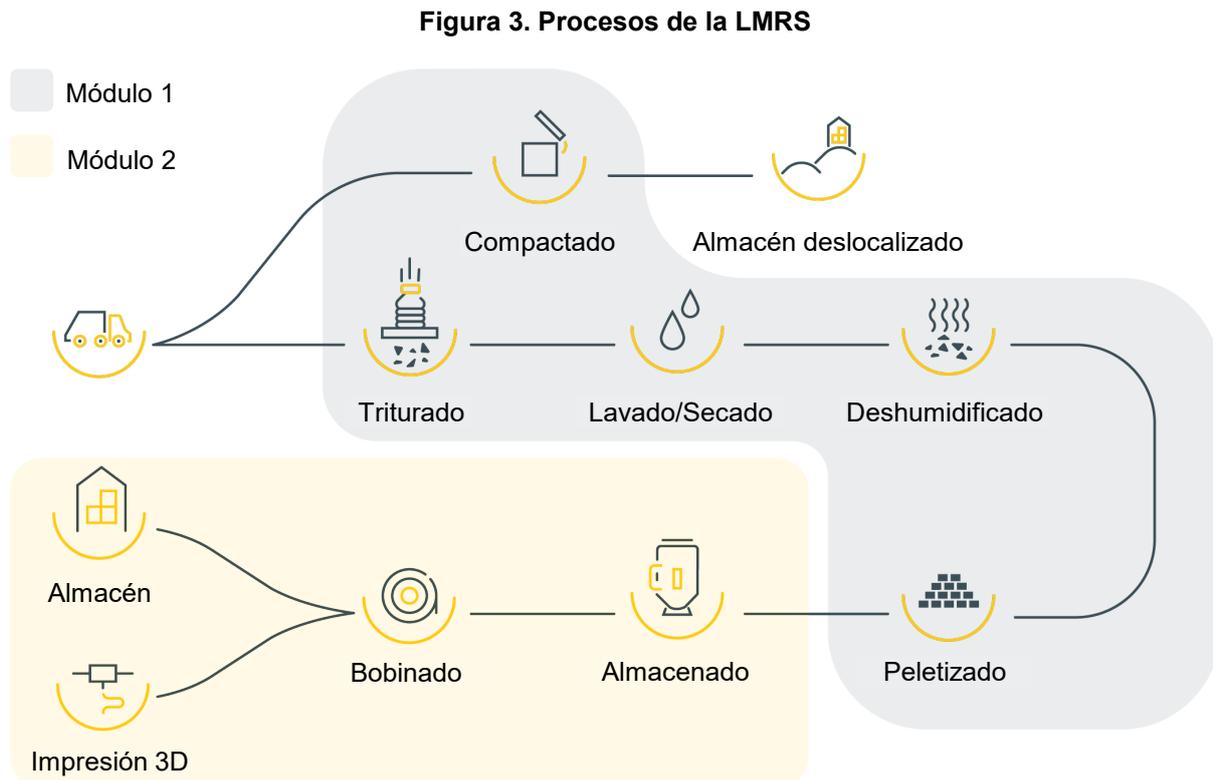
 Matía Zona El Balón Distrito 3 3 16,05 kg PET	 Bahía Blanca Zona Bahía Blanca Distrito 8 (7) 5 15,18 kg PET	 Medina Zona 2 ^a Aguada Distrito 9 6 15,66 kg PET	 Estadio Zona Estadio Distrito 10 5 15,45 kg PET
 Fray Félix Zona El Pópulo Distrito 6 3 15,81 kg PET	 Cortes Zona El Corte Inglés Distrito 8 4 15,35 kg PET	 Paseo Zona Paseo Marítimo Distrito 9 (10) 5 14,49 kg PET	 Zarza Zona Cortadura Distrito 10 5 15,45 kg PET

Proyectar la LMRS para un período específico (primavera, verano y otoño), facilita la elaboración de un itinerario cerrado. Esta itinerancia y estableciendo una semana para cada punto, determina una planificación de 40 semanas. Cuantos más puntos se introduzcan en el itinerario, menos repeticiones, extrayendo menos datos de los hábitos de reciclaje de cada

zona. Por ello, se opta por un ciclo de 8 puntos, como muestra la Figura 2, pasando la LMRS 5 veces por el mismo punto a lo largo de los nueve meses de itinerancia.

5.2. Procesos de la LMRS

La línea de procesos de LMRS, sintetizada en la Figura 3, requiere seleccionar la maquinaria necesaria para obtener los equipos necesarios que transformen los residuos en elementos impresos, estructurándose en base a restricciones, necesidades y soluciones compatibles con las técnicas elegidas.



El acopio se realiza manual, acercando el contenedor a la línea. Por ello, un radio de acción corto facilita su gestión. Una vez realizada la selección, el contenedor se devuelve a su lugar con los residuos rechazados. Esta selección de envases reduce las impurezas que pueda contener el material de salida. Seguidamente, la recepción de envases de diferentes plásticos reciclables (PET, PEAD, PEBD, PP, PVC, PS), son cribados en función de su material base, por lo que serán necesarios diferentes recipientes. Los residuos que no van a ser procesados en la LMRS pero sí cribados (PEBD, PEAD, PP, PVC), se compactan para reducir su volumen y facilitar su recogida, aumentando el valor de venta del material, antes de trasladarse a un almacén deslocalizado. Para este paso se opta por una prensa compactadora K-1-D. Por otro lado, el PET vuelve a cribarse, homogeneizando el material de salida, evitando la necesidad de maquinaria industrial y haciendo a los usuarios partícipes del proceso, al mostrarles los tipos de plásticos que componen los envases y su división para el procesado. Para este paso, se opta por 4 depósitos de 120 L (555x480x 937 mm con ruedas), así como una báscula que registre los datos diarios de recolección.

A continuación, el PET se tritura, ya que la obtención de escamas homogéneas facilita su procesado, almacenamiento y transporte. Para ello, se utiliza una trituradora Newest NT180, con capacidad de 50 kg/h, cuchillas escalonadas de 1/8" y conexión apta para el tipo de alimentación proyectado y su capacidad, abarcable, según los datos de acopio estimados. Una vez alcanzado el lote óptimo, las hojuelas trituradas se introducen por la tolva. Por el

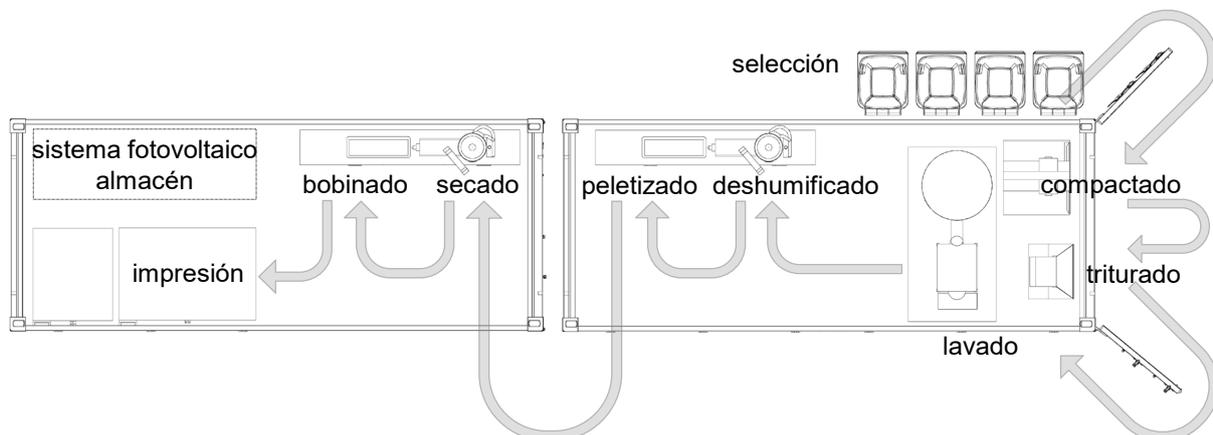
mismo lugar se introducen los aditivos y se procede al ciclo de lavado, con agua caliente, tensoactivos y sosa, lo que garantiza la eliminación de las sustancias impregnadas en la escama. Pasados 45 minutos se acciona el tornillo helicoidal que transportará el PET desde el fondo de la tolva a la cámara de centrifugado donde se iniciará el ciclo de enjuague para eliminar las sustancias aditivadas y se escurrirá el agua. Dado que los modelos industriales habituales, como LO20 y LO15 de TECNOFER, o los de NEUEHERBOLD, no cumplen los requisitos establecidos dimensionales y de consumo, se solicita un modelo personalizado a VIPLAT, que tendrá la capacidad para enjuagar y secar después del lavado, pero con las dimensiones y tolvas de entrada y salida adecuadas para estos flujos de trabajo.

Una vez terminado el ciclo de lavado, se introduce en la tolva de secado, que alimenta el proceso de peletizado, extrayéndose la humedad interna, lo que evita imperfecciones a la hora de su extrusión. En este caso, se utiliza una secadora MTP Minidryer XD3XTM, con capacidad de tolva superior a 20 kg, temperatura de secado entre 150°C y 175°C y tiempo de secado de 6-7h. Llegado el momento de comenzar con el peletizado, se requiere precalentar la máquina, elevando la temperatura del extrusor, así como accionar la palanca de descarga de la secadora para dar entrada al material. El pelet producido queda a la espera de la producción del hilo de diámetro determinado. Este proceso se realiza mediante un sistema compacto de 2 hilos, refrigerado por lecho fluidizado y posterior secado previo a corte. Posteriormente, se prosigue con el bobinado (gracias a una bobinadora Zhangjiagang Friend Machinery con motorización Siemens, certificación europea y capacidad de 2 kg/h), sumergiéndose en el lecho, superponiéndose en el canal de aire e introduciéndose por el medidor de diámetro. Finalmente, la impresión 3D se realiza en las impresoras Modix 120X y Modix 120Z, elegidas mediante decisión multicriterio por su mantenimiento, fiabilidad, fusor, soporte lógico y precio. Nótese que la mayor superficie del eje X permite la impresión simultánea de varios elementos, sacrificando la altura de los mismos, y la mayor altura del eje Z permite elementos más altos, aunque imprimiéndolos de manera individual.

5.3. Seguridad, funcionalidad y habitabilidad

La disposición de los elementos en el interior de los contenedores parte de la base de que la línea de procesos siga un solo camino de un único sentido, para facilitar el flujo de entradas y salidas, como muestra la Figura 4, además de que se opere en cada máquina desde su frontal. Asimismo, se reserva un espacio para el sistema eléctrico (regulador, inversor, batería y cuadro), así como para almacén de material bobinado sin uso.

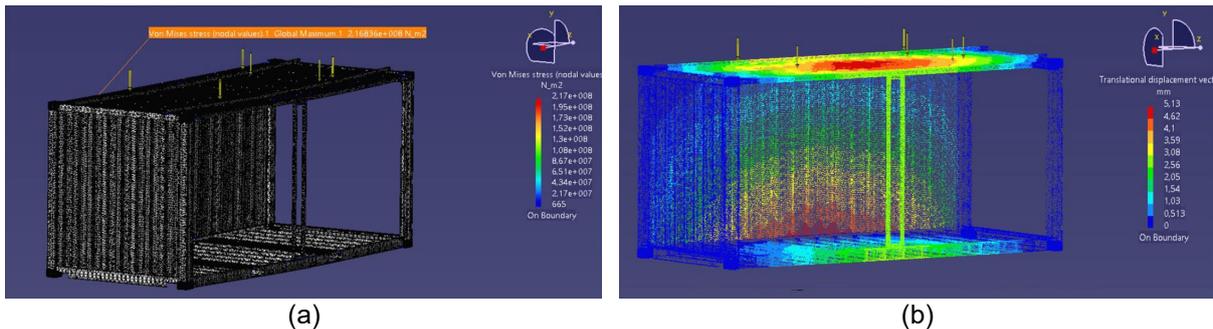
Figura 4: Disposición de la maquinaria y flujo de proceso en la LMRS



Para habilitar una entrada y salida amplias, se realizan aperturas en los contenedores, suprimiendo los frontales. Estas modificaciones estructurales necesitan un estudio mecánico para verificar que no se compromete la estabilidad de la estructura. En dicho estudio, se aplican las cargas y restricciones de la normativa UNE-EN 1647 (Asociación Española de Normalización, 2019), para estructuras Clase C, mayoradas en un 25% por aseguramiento. Además, se añade una carga distribuida de 630 Pa en cada bastidor, que soportará el peso de las placas solares fotovoltaicas. Los cálculos se desarrollan mediante análisis estático de simulación mecánica, a partir del modelado de una malla tetraédrica, con restricciones de empotramiento, utilizando el módulo de Finite Element Analysis (FEA) de CATIA V5.

Los resultados son satisfactorios, no suponiendo peligro ni comprometiendo el equilibrio inicial. En la Figura 5 (a) se muestran las tensiones de Von Mises (nivel de estrés tensional), que en el punto más crítico se alejan bastante del límite elástico minorado del acero (234,36 N/m² frente a 372,60 N/m², un 63%). Además, como muestra la Figura 5 (b), las deformaciones elásticas producidas en los dinteles están comprendidas entre 2,05 mm y 3,08 mm, por lo que las puertas pueden fabricarse con holgura de 4 mm. Cada hoja se enmarca en un bastidor de perfiles de acero estructural de 40x40-2,5 mm con tres bisagras Estebro, rodamiento axial y 2 pistones Dictator de 1.820 N, con conexión por rótula (serie EE 205801), cuyas fuerzas de subida y bajada quedan en 14 kg y 18 kg, respectivamente.

Figura 5: Análisis estructural del contenedor: (a) Tensiones de Von Mises, (b) Desplazamientos



Por otro lado, los contenedores no requieren el cumplimiento de la norma EN721 para la ventilación de seguridad en vehículos habitables de recreo (dado que la ocupación se realiza siempre con el sistema de puertas abiertas). Además, para garantizar la autonomía de la LMRS, se instala un sistema fotovoltaico autónomo, compuesto de 20 módulos fotovoltaicos (Canadian Solar Hiku 7, con 600 Wp y eficiencia del 21,2%), conectados en series de 2 en 10 ramas en paralelo, instalados en la cubierta y trasdós de las puertas proyectantes, así como de un regulador de carga (Leonicos SCP 4824, con una eficiencia del 98% y corriente de entrada de 240 A), un inversor con capacidad para absorber los picos de arranque que se produzcan en la LMRS (Victron Quattro 48/8000/100, con una potencia nominal de 8 kW y pico de 16 kW) y una batería estacionaria (Tubular Plate Ecosafe TZS-13, con una capacidad mínima de 2483 Ah, profundidad de descarga del 60% y pérdidas por conversión del 20%), con capacidad de carga desde medios externos de suministro.

La capacidad de generación de energía del sistema fotovoltaico determinará la capacidad de producción de la LMRS. Para calcularla, se usa Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) que la Unión Europea pone a disposición del ciudadano (Huld et al., 2012), seleccionando longitud, latitud e inclinación (horizontal). El estudio se centra en los meses de más exposición (febrero a octubre), a partir de la irradiancia solar mensual y las horas pico de sol. Asimismo, a partir de los datos de los módulos de paneles solares, se determina la producción mensual y diaria de la instalación, como recoge la Tabla 3.

Tabla 3. Producción de energía eléctrica del sistema fotovoltaico

Mes	Irridación solar mensual (kWh/m ²)	Horas Pico Sol (h/día)	Producción mensual (kWh/mes)	Días	Producción diaria (kWh/día)
Enero	90,57	2,43	1376,11	31	44,39
Febrero	120,12	3,21	1674,15	28	59,79
Marzo	147,42	5,63	1835,70	31	59,22
Abril	173,56	5,73	1903,44	30	63,45
Mayo	224,47	7,10	2205,34	31	71,14
Junio	243,44	8,22	2280,47	30	76,02
Julio	248,56	8,09	2442,01	31	78,77
Agosto	226,89	7,37	2514,23	31	81,10
Septiembre	170,64	5,96	2202,81	30	73,43
Octubre	137,75	4,09	2045,75	31	65,99
Noviembre	90,64	2,89	1470,37	30	49,01
Diciembre	76,52	2,60	1232,57	31	39,76

A partir de los datos de generación de energía, se pueden establecer unos tiempos de funcionamiento de los equipos. Estos tiempos se consideran en la Tabla 4, considerando que la LMRS está operativa 8 horas en primavera y otoño y 12 horas en verano.

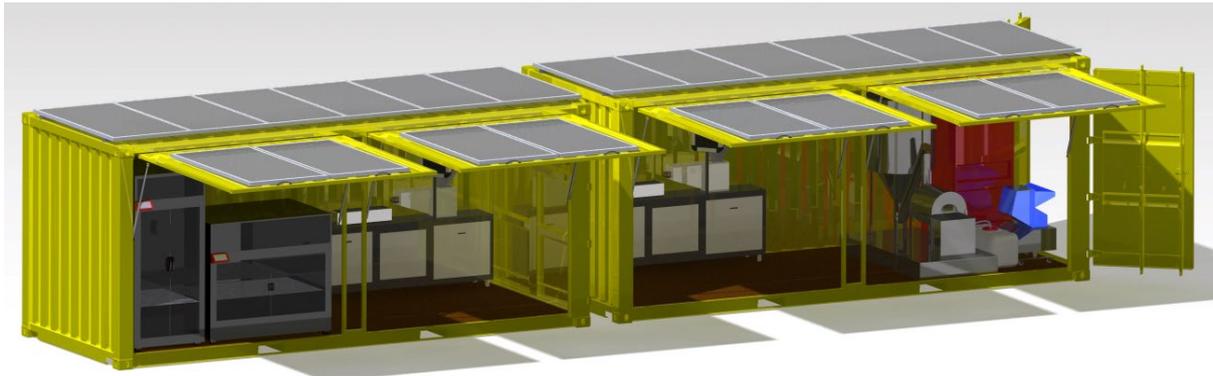
La movilidad semanal de la LMRS implica que el llenado y vaciado de los sistemas que necesiten agua se realizarán entre dichos movimientos. El único proceso que requiere circulación es el centrifugado, al retirar en cada uso el agua residual. Para ello, se instala un circuito y depósito con capacidad suficiente (400 L) hasta su vaciado semanal. Asimismo, para el desagüe de la lavadora, se adquiere un tanque de 600 L.

Tabla 4. Consumos de los equipos de la LMRS

Unidades	Equipo	Potencia Unitaria (W)	Funcionamiento diario (h)		Energía necesaria (Wh)	
			Resto ⁽¹⁾	Verano ⁽²⁾	Resto ⁽¹⁾	Verano ⁽²⁾
6	Lámparas	36	6	9	150	225
1	Compactadora	1.500	0,5	0,75	750	1.125
1	Trituradora	2.200	,5	0,75	1.100	1.650
1	Lavadora	750	1	1,5	750	1.125
1	Centrifugadora	3.500	0,5	0,75	1.750	2.625
2	Secadora	1.000	7	10,5	6.000	9.000
1	Peletizadora	2.500	8	12	15.000	22.500
1	Bobinadora	2.500	8	12	15.000	22.500
2	Impresoras 3D	1.800	6 (50%)	9 (50%)	10.800	16.200
Total		-	8	12	51.300	76.950

Finalmente, la Figura 5 muestra el conjunto 3D de la LMRS:

Figura 5: Imagen 3D de la LMRS



5.4. Procedimiento de modelado

El proceso de modelado se desarrolla para ofrecer la solución más ajustada a las necesidades urbanas del entorno en el que se ubica la LMRS. Las infraestructuras urbanas cercanas, instituciones públicas y asociaciones vecinales interesadas del entorno pueden hacer variar las necesidades demandadas. Los modelos seleccionados deben adaptarse a cada situación y variar mucho entre sí, pero siempre realizarse con el material recolectado por los ciudadanos de cada distrito, reduciendo gastos derivados de la compra de productos.

Una vez realizada la criba, el proceso de diseño aglutina la selección del modelo, así como su desarrollo y modelado. Entre las opciones disponibles, se preseleccionan las mecánica, tecnológica y cronológicamente viables. Esta preselección se somete a un proceso de decisión multicriterio, según estética, tamaño, complejidad y uso. Cabe destacar que el volumen de impresión determina el ancho de la boquilla de impresión, al reducir el tiempo de impresión considerablemente (aumentando la altura de capa, pero determinando la calidad del detalle) y aumentar la adhesión entre capa y capa, dando rigidez al elemento.

Los modelos diseñados en alguna de las aplicaciones de diseño disponibles en el mercado (CATIA V5 de Dassault Systemes, FUSION 360 de Autodesk, Rhinoceros de Robert McNeel & Associates), se exportan en formato “.STL” para su procesamiento en un laminador, como CURA 4.7 de Ultimaker. Una vez definidos los parámetros (altura de capa, grosor de pared, número de capas superior e inferior, densidad de relleno, velocidad de impresión, habilitación de retracción, activación de refrigeración, generación de soporte y adherencia a la placa), se procede a la segmentación, para calcular el tiempo y filamento necesarios. Si el dato es óptimo, en términos de tiempo y material, se procede a la impresión. En caso contrario, se rediseña para redefinir optimizaciones estructurales o reducir tiempo o material y se vuelven a modificar los parámetros de laminación, en beneficio de la línea de producción. Estos modelos finales se someten a renderización, como muestra la Figura 6.

Figura 6: Imagen virtual de modelos seleccionados: (a) banco, (b) plástica



(a)

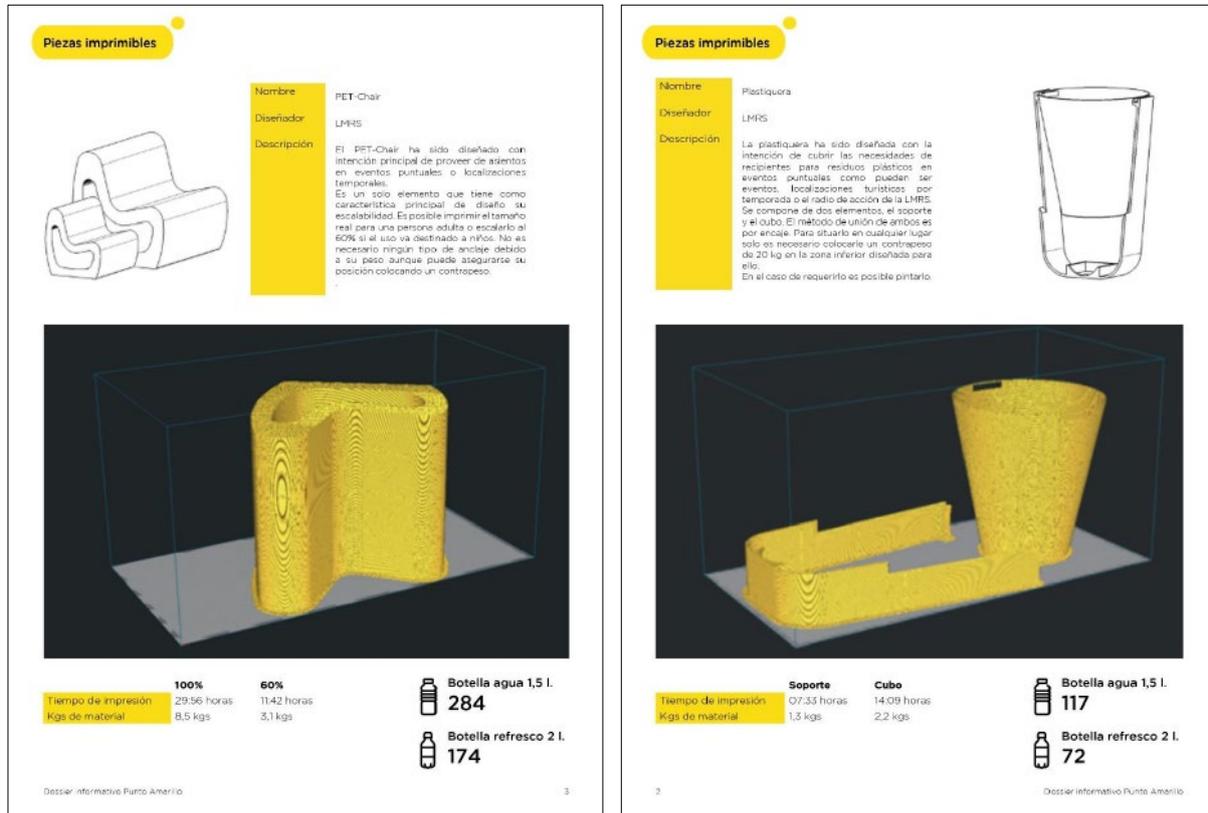


(b)

En paralelo, una vez que se van seleccionando, modelando, optimizando e imprimiendo soluciones, se va construyendo un dossier con los modelos diseñados, para ofrecerlos en

sucesivos recorridos (ver ejemplo en Figura 7). Además, la imagen virtual también formará parte del documento interno que contendrá los parámetros de laminación óptimos, en la búsqueda del mejor resultado. Cada ficha contendrá una breve descripción de la funcionalidad del producto, tiempo de impresión, peso final y material de reciclaje necesario, medido, para una comprensión rápida, en botellas de agua de 1,5 L y de refresco de 2 L.

Figura 7: Dossier de modelos seleccionados: (a) banco, (b) plástiguera



(a)

(b)

5.5. Imagen de marca

Unos de los objetivos del proyecto es que los consumidores finales asocien la LMRS al concepto del reciclaje de plásticos, facilitando la experiencia de participación en el proceso. El destinatario final de la LMRS no es solo el ciudadano que recicla, sino aquel que aún no confía en los sistemas de reciclaje actuales, bien porque no saben cómo funcionan o bien porque creen que no sirve para nada. Por tanto, la LMRS debe proporcionar información sobre el reciclaje y sobre cómo se gestionan a pequeña escala los residuos generados.

La imagen de la LMRS debe comenzar por su nombre, lo que facilita su referencia. La decisión afecta a la experiencia de la marca, pero ayuda a diferenciar este modelo de reciclaje con otros ya existentes. Por ello, se busca un nombre que aporte valor y personalidad a la LMRS, de forma sencilla y directa, ayudando a definir la idea que se quiere transmitir. Después de analizar las palabras clave y considerando su itinerancia y autosuficiencia, se determina el nombre más apropiado para definir todo el conjunto: PUNTO AMARILLO. A continuación, debe elegirse un lema, una frase corta y fácil de recordar. En este caso, se opta por potenciar la idea de propiedad sobre el plástico que se adquiere al pagar por cualquier producto que venga envasado en botella, concienciando al consumidor final para decidir qué hacer con su plástico, pues es suyo: "Tu botella, Tu plástico". Seguidamente, se opta por un imago tipo para representar la marca, como muestra la Figura 8 (a), que representa la idea de conjunto del proyecto, por lo que se elige la forma de un punto, para concretar que todo lo que se hace en la LMRS se hace en un solo lugar. Asimismo, las geometrías interiores del punto representan

las distintas capas que componen el proceso de reciclado. Finalmente, la cartelería en gran formato fomenta el reconocimiento de la marca debido a su gran tamaño, versatilidad, asequibilidad y exposición, como muestra la Figura 8 (b)

Figura 8: Publicidad de la LMRS: (a) arte de imagotipo, (b) ejemplo de cartelería



6. Conclusiones

Esta investigación plantea el desarrollo de un sistema complementario al modelo actual de reciclaje en el que se acerca el proceso de reciclaje al ciudadano, a la vez que se le muestran algunos de los beneficios que se obtienen en la reutilización del plástico como recurso (en particular el plástico PET), optimizando las rutas de recogida (tanto selectivas como no selectivas), reduciendo los kilómetros de tránsito de camiones de recogida y reparto (al quedar todo el ciclo en la ciudad), reduciendo el volumen de residuos en las plantas de cribado y mostrando cómo las nuevas tecnologías pueden ayudar a dar una nueva vida al plástico, fomentando, además, la participación ciudadana y la economía colaborativa.

Para el desarrollo de la Línea Móvil de Reciclaje Selectivo (LMRS) de plásticos, se reciclan y adecuan 2 contenedores marítimos de 20 pies, lo que permite gestionar el triaje de unos 450 kg de residuos plásticos cribados por cada una de las 40 semanas en que la LMRS está activa, así como la fabricación de 100 kg de filamento semanales, materia prima que retorna al vecindario en forma de elementos de entorno urbano, elaborados con máquinas 3D de fabricación aditiva. Además, el diseño de la exposición itinerante muestra el proceso productivo, concienciando sobre los estragos que la ineficiencia de la actual gestión de residuos está produciendo en el entorno. Adicionalmente, la movilidad de la línea permite que pueda moverse entre distritos, llegando a la mayoría de la población local, alcanzando una gestión anual de plásticos de más de 18 t y generando unas 4 t de materia prima) para la creación de elementos urbanos a disposición de la ciudadanía.

La LMRS está disponible para recibir visitas de colegios e institutos y ofrecerles concursos de ecodiseño, así como realizar campañas en temporada (como asientos, mesas y juguetes de playa en verano o elementos decorativos en Navidad). Además, su autonomía energética le permitiría desplazarse donde fuese necesario. Asimismo, esta propuesta es adecuada para ser exportada a otras localidades, por lo que su itinerancia no es sólo local.

Referencias

- Asociación Española de Normalización. (2019). *UNE-EN 1647:2019. Vehículos habitables de recreo. Residencias móviles. Requisitos de habitabilidad relativos a la salud y a la seguridad*. Asociación Española de Normalización.
- Bank, M. S., Swarzenski, P. W., Duarte, C. M., Rillig, M. C., Koelmans, A. A., Metian, M., Wright, S., Provencher, J. F., Sanden, M., Jordaan, A., Wagner, M., Thiel, M., & Ok, Y. S. (2021). Global Plastic Pollution Observation System to Aid Policy. *Environmental Science & Technology*, 55(12), 7770–7775. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00818>
- Feldman, D. (2008). Polymer History. *Designed Monomers and Polymers*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.1163/156855508X292383>
- Gaudet, J. (2019). Papyrus and the Pharaoh's Treasure. *Near Eastern Archaeology*, 82(4), 248–255. <https://doi.org/10.1086/704258>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gnesin, G. G. (2013). On the Origin of Metallurgical Technologies in the Bronze Age. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 52(7–8), 477–488. <https://doi.org/10.1007/s11106-013-9550-6>
- Gobierno de España. (2022). Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular. *Boletín Oficial Del Estado*, 85, 48578–48733.
- Hawkins, G. (2012). The Performativity of Food Packaging: Market Devices, Waste Crisis and Recycling. *The Sociological Review*, 60(2), 66–83. <https://doi.org/10.1111/1467-954X.12038>
- Holmström, J., Ketokivi, M., & Hameri, A.-P. (2009). Bridging Practice and Theory: A Design Science Approach. *Decision Sciences*, 40(1), 65–87. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00221.x>
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86(6), 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>
- Lebreton, L., & Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Lukka, K. (2003). The Constructive Research Approach. In L. Ojala & O.-P. Hilmola (Eds.), *Case study research in logistics* (pp. 83–101). Publications of the Turku School of Economics and Business Administration.
- March, S. T., & Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4), 251–266. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2019). *Residuos de competencia municipal*. Memoria Anual de Generación y Gestión de Residuos. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/Memoria-anual-generacion-gestion-residuos.aspx>
- Peña, J. T. (2020). *Recycling and Reuse in the Roman Economy* (C. N. Duckworth & A. Wilson (eds.)). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198860846.001.0001>
- Picuno, C., Van Eygen, E., Brouwer, M. T., Kuchta, K., & Thoden van Velzen, E. U. (2021). Factors Shaping the Recycling Systems for Plastic Packaging Waste—A Comparison between Austria, Germany and The Netherlands. *Sustainability*, 13(12), 6772. <https://doi.org/10.3390/su13126772>
- Pierini, V. I., Mazzeo, N., Cazenave, M., & Semmartin, M. (2021). Waste generation and pro-environmental behaviors at household level: A citizen science study in Buenos Aires (Argentina). *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105560. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105560>
- Porta, R. (2019). The Plastics Sunset and the Bio-Plastics Sunrise. *Coatings*, 9(8), 526. <https://doi.org/10.3390/coatings9080526>

- Rigamonti, L., Grosso, M., Møller, J., Martínez-Sánchez, V., Magnani, S., & Christensen, T. H. (2014). Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.012>
- Stöger, G. (2014). Environmental Perspectives on Pre-Modern European Cities—Difficulties and Possibilities. In M. Knoll & R. Reith (Eds.), *An Environmental History of the Early Modern Period: Experiments and Perspectives* (pp. 51–54). LIT Verlag.
- Todd, A. M. (2013). *Communicating Environmental Patriotism*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203521694>
- Urbaser. (2019). *Declaracion Ambiental 2019. Centro de Recepción y Reciclaje de El Puerto de Santa María (Cádiz)*.
- van Aken, J., Chandrasekaran, A., & Halman, J. (2016). Conducting and publishing design science research. *Journal of Operations Management*, 47–48(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2016.06.004>
- Vaquero, M., Alonso, S., García-Catalán, S., García-Hernández, A., Gómez de Soler, B., Rettig, D., & Soto, M. (2012). Temporal nature and recycling of Upper Paleolithic artifacts: the burned tools from the Molí del Salt site. *Journal of Archaeological Science*, 39(8), 2785–2796. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.04.024>
- Wang, C., Liu, Y., Chen, W., Zhu, B., Qu, S., & Xu, M. (2021). Critical review of global plastics stock and flow data. *Journal of Industrial Ecology*, 25(5), 1300–1317. <https://doi.org/10.1111/jiec.13125>

Communication aligned with the Sustainable Development Objectives

