



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

Programa de Doctorado en Medicina 3139

Facultat de Medicina i Odontología

Departament de Medicina

Tesis Doctoral

**Estudio del impacto medioambiental del
material fungible en endoscopia digestiva**

Pedro López Muñoz

Director: Dr. Vicente Lorenzo-Zúñiga García

Director y tutor: Dr. Vicente Garrigues Gil

Mayo 2024

INFORME DIRECTORES/AS Y TUTOR/A PARA DEPÓSITO DE TESIS

Directores:

1.- Apellidos y nombre: Lorenzo-Zúñiga García, Vicente N.I.F. 33295437Q, Departamento/Instituto: Servicio Medicina Digestiva. Unidad de Endoscopia Centro: Hospital Universitari i Politècnic La Fe

2.- Apellidos y nombre: Garrigues Gil, Vicente N.I.F. 22521439T, Departamento/Instituto: Medicina, Centro: Facultad de Medicina y Odontología. Universitat de València

Tutor:

Apellidos y nombre: Garrigues Gil, Vicente N.I.F. 22521439T, Departamento/Instituto: Medicina, Centro: Facultad de Medicina y Odontología. Universitat de València

Directores/as y tutor/a, respectivamente, de la tesis doctoral: “ESTUDIO DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL MATERIAL FUNGIBLE EN ENDOSCOPIA DIGESTIVA”

de D. Pedro López Muñoz,

estudiante del Programa de Doctorado **3139 Medicina** (RD99/2011) en Medicina de la Universitat de València, emiten informe FAVORABLE para la realización del depósito y la defensa de la tesis doctoral.

Fecha: 30/04/2024

Fdo.: Lorenzo-Zúñiga García, Vicente

Fdo.: Garrigues Gil, Vicente

Director

Director y Tutor

**ESCUELA DOCTORAL
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA**

A mis padres, que han sembrado en mí la semilla de la investigación y han sacado siempre tiempo para apoyarme. Gracias por haberme enseñado lo que significa el respeto y la voluntad. Ojalá algún día mire atrás y piense que he podido parecerme a vosotros.

A mi mujer, Adriana, compañera de vida y mejor amiga. Gracias por apoyar, comprender y estimular las largas horas que han supuesto esta tesis. Por hacerme mejor persona todos los días de nuestra vida.

AGRADECIMIENTOS

A Vicente Lorenzo-Zúñiga, director de esta tesis, promotor de esta línea de investigación y mi mentor de endoscopia. Gracias por tu confianza, por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto y por adentrarme en el mundo de la endoscopia digestiva.

A mi jefe de sección, Vicente Pons, mi jefa de servicio, Pilar Nos, y mis compañeros del servicio de Medicina Digestiva y la Unidad de endoscopias. Quiero agradecerlos todo el aprendizaje que me habéis otorgado. Mi conocimiento profesional viene de pequeños fragmentos de cada uno de vosotros.

A Vicente Garrigues, director y tutor de esta tesis, muchas gracias por tu accesibilidad y por compartir tu dilatada experiencia.

A todos los ingenieros del CBIT de la Politécnica de Valencia, porque han mostrado siempre disponibilidad y entusiasmo para enfrentar los retos de este trabajo, y sin ellos no hubiera sido posible.

A los residentes que he tenido el placer de acompañar durante su formación en endoscopia. Vuestro crecimiento ha sido la mejor motivación para mantenerme actualizado.

A mis antiguos compañeros de residencia y grandes amigos, Garrido y del Pozo, por comprender mis inquietudes, aportarme un razonamiento crítico y apoyarme en todos mis proyectos. Porque aplaudimos todos y cada uno de nuestros progresos.

CONTENIDOS

RESUMEN.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE ABREVIATURAS.....	17
LISTA DE FIGURAS.....	19
LISTA DE TABLAS.....	25
1. INTRODUCCIÓN	21
1.1. Impacto ambiental del sistema sanitario	21
1.2. Gestión de residuos en el medio hospitalario y en la unidad de endoscopia digestiva.....	26
1.3. Fuentes de emisiones de carbono en la unidad de endoscopia	31
1.3.1. Consumo de material fungible	32
1.3.2. Reprocesamiento de equipos	33
1.3.3. Utilización operativa de recursos.....	34
1.3.4. Gastos derivados de la administración.....	35
1.3.5. Desplazamientos y viajes.....	35
1.4. Sostenibilidad en endoscopia digestiva o <i>Green Endoscopy</i>	36
1.4.1. Reducción del número de exploraciones inapropiadas en base a las guías de práctica clínica.....	37
1.4.2. Reducción del uso de medicación y otras medidas evitables.....	38
1.4.3. Adaptación del uso de recursos en la sala de endoscopia	38
1.4.4. Logística sostenible en la unidad de endoscopia	40
1.5. La sostenibilidad como protocolo de trabajo	41
1.6. Material fungible en endoscopia digestiva	43
1.7. Infecciones asociadas a duodenoscopios e impacto medioambiental que representan los duodenoscopios de un solo uso.	47
1.8. Análisis de la composición de materiales.....	52
1.9. Análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de la huella de carbono en endoscopia digestiva.....	55
2. HIPÓTESIS	65
3. OBJETIVOS	69
4. METODOLOGÍA	73
4.1. Evaluación ambiental de accesorios de endoscopia digestiva.....	73
4.1.1. Análisis de la composición de accesorios fungibles de endoscopia digestiva	73
4.1.1.1. Selección de las muestras de instrumental utilizadas en el estudio	73

4.1.1.2. Tratamiento previo de las muestras.....	76
4.1.1.3. Análisis por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	77
4.1.1.4. Análisis termogravimétrico (TGA)	82
4.1.1.5. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	83
4.1.1.6. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) con detector de energía dispersiva de Rayos X (EDX).....	86
4.1.2. Análisis de ciclo de vida de accesorios fungibles en endoscopia digestiva	88
4.1.2.1. Introducción al análisis de ciclo de vida	88
4.1.2.2. Análisis de inventario y estimaciones medioambientales	91
4.1.2.3. Evaluación e interpretación del impacto medioambiental	95
4.2. Intervención de sostenibilidad en una Unidad de endoscopia y evaluación de su impacto.....	98
4.2.1 Hipótesis de intervención de sostenibilidad (Green Mark).....	98
4.2.2 Estudio prospectivo de sostenibilidad.....	101
4.3. Evaluación ambiental de duodenoscopios reutilizables y desechables.....	102
4.3.1. Análisis de la composición de duodenoscopios	102
4.3.1.1. Selección del instrumental	102
4.3.1.2. Fragmentación, inspección visual y pesado	103
4.3.1.3. Caracterización de los duodenoscopios	103
4.3.2. Análisis de ciclo de vida de duodenoscopios desechables y reutilizables.....	104
4.3.2.1. Análisis de la producción y transporte de duodenoscopios.....	104
4.3.2.2. Análisis del reprocesamiento de DR y gestión de residuos de DD	108
4.4. Comparación de escenarios de sostenibilidad con el uso universal de duodenoscopios reutilizables y desechables	111
5. RESULTADOS	115
5.1. Evaluación ambiental de accesorios de endoscopia digestiva	115
5.1.1. Análisis de la composición de accesorios fungibles de endoscopia digestiva	115
5.1.2. Análisis de ciclo de vida de accesorios fungibles en endoscopia digestiva	121
5.2. Intervención de sostenibilidad en una Unidad de endoscopia y evaluación de su impacto.....	126
5.3. Evaluación ambiental de duodenoscopios reutilizables y desechables.....	129
5.3.1. Análisis de la composición de duodenoscopios desechables y reutilizables.....	129
5.3.2. Análisis de ciclo de vida de duodenoscopios desechables y reutilizables.....	132
5.4 Comparación de escenarios de sostenibilidad con el uso universal de duodenoscopios reutilizables y desechables	134
6. DISCUSIÓN	139
6.1 Evaluación ambiental de los accesorios endoscópicos	139
6.2 Evaluación ambiental de los duodenoscopios.....	150

6.3 Interés científico de la tesis doctoral	167
7. CONCLUSIONES FINALES	173
8. BIBLIOGRAFÍA.....	177
9. ANEXOS	193

RESUMEN

La endoscopia digestiva ocupa el tercer lugar en producción de residuos en el medio hospitalario, por el amplio uso de dispositivos médicos desechables. Además, debido a los brotes infecciosos asociados a duodenoscopios contaminados, se han desarrollado endoscopios de un solo uso, lo que aumenta considerablemente los residuos y la huella de carbono. Nuestro objetivo consiste en evaluar el impacto ambiental de los accesorios endoscópicos y duodenoscopios desechables, así como crear estrategias de sostenibilidad.

Mediante técnicas de análisis, estimamos la composición de pinzas de biopsia, asas de polipectomía y hemoclips de diferentes casas comerciales. Conocer la composición es crucial para un cálculo preciso de la huella de carbono. Realizamos un análisis de ciclo de vida (ACV) de los accesorios endoscópicos (producción, transporte y gestión de residuos). Creamos una estrategia de sostenibilidad para reciclar parcialmente los accesorios, estableciendo una marca para separar las partes que no entran en contacto con el paciente ni el canal de trabajo del endoscopio (*propuesta green mark*).

De igual modo, realizamos una evaluación ambiental de los duodenoscopios reutilizables (DR) y desechables (DD), añadiendo la etapa de desinfección y reprocesamiento, para comparar el uso de DR respecto a la adopción global de duodenoscopios desechables.

Identificamos diferencias considerables en la composición de los accesorios endoscópicos entre casas comerciales (sobre todo polímeros plásticos de alto potencial climático). Encontramos diferencias significativas en pinzas de biopsia (0,31–0,47 kg de CO₂ equivalentes (kgCO₂-eq)) y hemoclips (0,41–0,57 kgCO₂-eq) entre las casas comerciales. Determinamos la marca *green mark* a 131,26 cm desde la punta del accesorio para gastroscopio y 195,32 cm para colonoscopio. En una semana de actividad, los accesorios emitieron 67,74 kg CO₂-eq, y aplicando la propuesta de sostenibilidad, redujimos hasta el 28% la huella de carbono y un 62% el peso total (4,7 kg de residuos).

El DR pesó casi 3,5 kg, mientras que el DD-A 943 g y el DD-B 715,5 g. La composición estructural del DR consistió en aleaciones de metales (95%), mientras que los DD estuvieron compuestos por plásticos al 70-81%. El ACV durante toda la vida útil del DR (8 años) demostró su perfil sostenible, produciendo entre 62 y 82 veces menos

emisiones que el uso universal de DD (151,7 vs. 10512-12640 kg CO₂-eq). También observamos diferencias entre DD-A y DD-B (7.9 vs. 6.6 kg CO₂-eq por cada uso).

Conocer la composición y la huella de carbono de los diferentes accesorios endoscópicos es vital para elegir las opciones más sostenibles. Además, innovaciones como la *green mark* podrían alterar el diseño de los accesorios para fomentar el reciclaje y disminuir los residuos. Por último, el uso universal de DD supone un riesgo medioambiental relevante, por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre la prevención de eventos de contaminación y la responsabilidad ambiental.

ABSTRACT

Due to the high consumption of single-use medical devices, gastrointestinal endoscopy units represent the third largest producers of medical waste. In addition, infection outbreaks associated with contaminated reusable duodenoscopes (RDs) have led to the development of novel single-use duodenoscopes (SDs). We aimed to determine the composition and life cycle assessment (LCA) of endoscopic instruments and to evaluate a sustainability proposal based on a mark on the instruments that identifies parts can be safely recycled or 'green mark'. Furthermore, this study aims to analyse the material composition and LCA of RDs and SDs to assess the sustainability of global SD implementation.

Material composition analysis and LCA of forceps, snares and clips from four different manufacturers were performed. The carbon footprint of production, transportation and end-of-life of these instruments was calculated. We developed a strategy for partial recycling single-use accessories, considering a mark away from the point of contact with the working channel (green mark). A one-week prospective study was conducted to evaluate this proposal. Consequently, we analysed the material composition and assessed the LCA of one RD and two SDs from different manufacturers (A, B). The carbon footprint of production, transportation, reprocessing and end-of-life was calculated. We compared the sustainability strategies of traditional use of RDs with universal use of SDs over the lifetime of one RD.

The composition of single-use accessories from different manufacturers varied widely, with plastics with a high global warming potential being found in particular. Significant differences were found between the manufacturers for forceps (0.31–0.47 kg of CO₂ equivalent (CO₂ -eq)) and haemoclips (0.41–0.57 kg CO₂ -eq) between the manufacturers. The green mark was set at 131.26 cm for the gastroscope and 195.32 cm for the colonoscope. One-week activity produced 67.74 kg CO₂ -eq. Applying our sustainability intervention, we could reduce the carbon footprint by up to 28% and recycle up to 62% of the total weight of the instrument. RDs were substantially heavier (3489 g) than SD-A (943 g) and SD-B (715.5 g). RDs were mainly metallic alloys (95 %), whereas SDs were mainly plastic polymers and resins (70-81 %). The LCA demonstrated the sustainability of RDs, with a lifecycle carbon footprint 62-82 times lower compared to the universal use of SDs (151.7 vs. 10512-12640 kg CO₂-eq). Differences were observed between SD-A and SD-B (7.9 vs. 6.6 kg CO₂-eq per endoscope). End-of-life incineration

emissions for SDs were the most significant environmental contribution.

Understanding of material composition and carbon footprint is crucial to select the most sustainable alternatives. A green mark on accessories to identify recyclable parts could significantly reduce our environmental impact. Widespread adoption of SD poses greater environmental challenges, requiring a balance between infection control and environmental responsibility. Carbon footprint labelling can help healthcare institutions make sustainable choices and promote environmentally responsible healthcare practices.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
ACV	Análisis de ciclo de vida
ASGE	Sociedad americana de endoscopia digestiva
ATR-FTIR	Reflactancia total atenuada y Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier
CBIT	Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular
CFC	Clorofluorocarbono
COVID-19	Corona virus disease 19
CPRE	Colangiopancreatografía retrógrada endoscópica
DAI	Duodenoscope associated infection
DD	Duodenoscopio desechable
DR	Duodenoscopio reutilizable
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
EDX	Energía dispersiva de Rayos X
EEUU	Estados Unidos de América
EfW	Aprovechamiento energético de residuos (Energy-from-Waste)
EPI	Equipos de protección individual
ESGE	Sociedad Europea de Endoscopia Digestiva
EVA	Etilvinilacetato
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (Food and Drug Administration)
FESEM	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo
FTIR	Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier
gCO ₂ -eq	Gramos de CO ₂ equivalentes
GEI	Gases de efecto invernadero
GWP	Potencial de calentamiento global (global warming potential)
HDPE	Polietileno de alta densidad
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IR	Radiación infrarroja
kgCO ₂ -eq	Kilogramos de CO ₂ equivalentes
KtCO ₂ -eq	Kilos de toneladas métricas de CO ₂ equivalentes
LDPE	Polietileno de baja densidad
LLDPE	Polietileno de baja densidad lineal

MDPE	Polietileno de densidad media
MDRO	Multi-drug resistant organism
MPs	Macroplásticos
MtCO ₂ -eq	Millones de toneladas métricas de CO ₂ equivalentes
NHS	Servicio Nacional de Salud (Reino Unido)
NPs	Nanoplásticos
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PC	Policarbonato
PDMS	Polidimetilsiloxano
PE	Polietileno
PEU	Poliéster-uretano
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoroetileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloruro de polivinilo
QR	Quick response
RBM	Gestión de residuos biomédicos
SS	Acero inoxidable (stainless steel)
tCO ₂ -eq	Toneladas métricas de CO ₂ equivalentes
Td	Temperatura de descomposición
Tg	Temperatura de transición vítrea
TGA	Análisis termogravimétrico
Tm	Temperatura de fusión
WtE	Waste-to-energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.01: Proporción de emisiones de gases efecto invernadero en el entorno hospitalario	23
Figura 1.02: Representación del impacto medioambiental de los diferentes departamentos e instituciones dentro del sistema sanitario de Australia	24
Figura 1.03: Sala de endoscopia intervencionista, con presencia de pantallas para visualización endoscópica y radiológica, procesadores de endoscopia y ecoendoscopia, torre de electrocoagulación, arco en C de rayos X, dispositivos de ventilación y anestesia, monitores de constantes vitales, bombas de perfusión.....	28
Figura 1.04: Contenedores de residuos sanitarios de riesgo tipo III (A y B), y residuos citotóxicos y citostáticos tipo IV (C)	29
Figura 1.05: Material desechable necesario para cualquier exploración endoscópica bajo sedación, sin incluir EPI ni accesorios endoscópicos a través del canal de trabajo	33
Figura 1.06: Máquinas de desinfección y lavado de endoscopios (A y B) y armarios de secado (C)	34
Figura 1.07: Registro físico de informes de endoscopia terapéutica almacenados a lo largo de los años en una Unidad	36
Figura 1.08: Muestras de anatomía patológica de pólipos de colon en una sola sesión de colonoscopias programadas	39
Figura 1.09: Accesorios fungibles de uso endoscópico una vez superada su fecha de caducidad, presentes en una unidad de endoscopia digestiva.....	40
Figura 1.10: Contribución en emisiones de efecto invernadero de las diferentes actividades necesarias para el funcionamiento de una unidad de endoscopia. Las líneas verticales representan el porcentaje de incertidumbre.....	42
Figura 1.11: Ejemplo de un producto de la industria alimentaria con etiqueta medioambiental.....	43
Figura 1.12: Contenedor de residuos biomédicos de endoscopia digestiva, con gran número de accesorios de un solo uso como pinzas de biopsia, asas de polipectomía, agujas de inyección y hemoclips	45
Figura 1.13: Parte distal con capuchón desechable de un duodenoscopio reutilizable de la empresa Fujifilm. Tecnología utilizada para facilitar el reprocesamiento y disminuir el riesgo de infección	49
Figura 1.14: Duodenoscopios desechables disponibles en el mercado: A) Duodenoscope model aScope (Ambu Innovation GmbH), B) EXALT Model D Single-Use Duodenoscope (Boston Scientific Corporation).....	50

Figura 1.15: Línea de tiempo que muestra eventos importantes en la producción y detección de plásticos.....	53
Figura 1.17: Fases de un análisis de ciclo de vida teniendo en cuenta los insumos o entradas (inputs) y los resultados o salidas (outputs).....	58
Figura 4.01: Asa de polipectomía de uso endoscópico con extremo distal serrado y con conexión a electrocoagulación para resección con fuente de diatermia.....	74
Figura 4.02: Pinza de biopsia de uso endoscópico con extremo distal de palas rectas para obtención de material histológico.....	75
Figura 4.03: Clip hemostático de uso endoscópico con extremo distal que presenta un sistema de liberación que se separa del cuerpo del dispositivo una vez accionado	76
Figura 4.04: Accesorios endoscópicos fungibles de diferentes casas comerciales (A-D) seleccionados para estudio	76
Figura 4.05: Ejemplo de tabla de la categorización del asa de polipectomía B. Peso de las diferentes partes del instrumento una vez fragmentado	77
Figura 4.06: Clip (A) una vez fragmentado y catalogado en las diferentes partes según una primera inspección visual. Posterior toma de muestras con pesado y preparación para su análisis instrumental	78
Figura 4.07: Eventos posibles en el estudio con DSC de un material polimérico	79
Figura 4.08: Calorimetría diferencial de barrido de cuatro tipos de polietileno. (polietileno de baja densidad, baja densidad lineal, alta densidad y media densidad, LDPE, LLDPE, HDPE, MDPE, respectivamente).....	80
Figura 4.09: Instrumentación utilizada en los estudios térmicos. A la izquierda el equipo de análisis termogravimétrico utilizado. A la derecha el calorímetro diferencial de barrido	81
Figura 4.10: A) Termogramas de algunos materiales poliméricos comunes. (Poliestireno, PS; polipropileno, PP; polietileno de baja densidad, LDPE; polietileno de alta densidad, HDPE). B) primera derivada de los cambios de masa con la temperatura para los termogramas mostrados en A	83
Figura 4.11: Espectro FTIR de polímeros plásticos como LDPE, PS y una mezcla de ambos. (polietileno de baja densidad, LDPE; poliestireno, PS).....	85
Figura 4.12: Esquema de una sección transversal de un elemento ATR trapezoidal multirreflexión.....	85
Figura 4.13: Esquema sobre el análisis de la composición de una muestra por FESEM / EDX. A) La interacción del haz de electrones del microscopio sobre la muestra produce electrones, rayos X y luz visible.UV. B) Imagen que muestra la generación de rayos X. C) Imagen de un espectro EDX de una muestra metálica	87
Figura 4.14: Imágenes de FESEM (derecha) y el correspondiente espectro EDXFR (izquierda) de una muestra de acero inoxidable (a) y titanio oxidado (b)	88

Figura 4.15: Microscopio electrónico FESEM Zeiss Ultra-55	89
Figura 4.16: Fases evaluadas en el análisis de ciclo de vida y diagrama de flujo del sistema de productos.....	91
Figura 4.17: Creación de un producto, con su flujo de salida correspondiente mediante el software openLCA	92
Figura 4.18: Constitución de los flujos de entrada y de salida de un producto (fabricación del asa de polipectomía (A)) mediante el software openLCA.....	93
Figura 4.19: Creación de un sistema a partir del producto (fabricación del asa de polipectomía (A)) y cálculo de impactos medioambientales derivados	94
Figura 4.20: Creación de un producto y sistema que aglutine la fabricación y el transporte (A), junto con el modelo gráfico de flujos de entrada y salida del sistema completo (B).....	96
Figura 4.21: Indicadores medioambientales sobre los que aporta información openLCA una vez realizado un ACV	97
Figura 4.22: Huella de carbono en kgCO ₂ -eq de la producción de la pinza de biopsia (C), estratificado por impacto ecológico del uso de cada material.....	98
Figura 4.23: Esquema de la hipótesis de intervención sostenible green mark, creando una marca a partir de la cual el accesorio no está contaminado y puede evitarse su incineración.....	99
Figura 4.24: Intervención de sostenibilidad “green mark” sobre la pinza (A), antes y después de su fragmentación	100
Figura 4.25: De izquierda a derecha, el DR y los DD de la casa comercial A y B.	103
Figura 4.26: Endoscopio desechable durante su manipulación, fragmentación y categorización de sus diferentes partes.....	103
Figura 4.27: Creación del producto de la fabricación del DD-A dentro de su análisis de ciclo de vida.	105
Figura 4.28: Creación del producto del transporte y fabricación combinados del DD-B dentro de su análisis de ciclo de vida.	106
Figura 4.29: Diagrama de flujo del sistema completo de análisis de ciclo de vida de la producción y el transporte del duodenoscopio reutilizable.	107
Figura 4.30: Creación de producto en el ACV en relación a agentes detergentes y desinfectantes utilizados durante el reprocesamiento de endoscopios reutilizables.....	108
Figura 4.31: Huella de carbono en kg CO ₂ -eq relativa a los detergentes utilizados en el reprocesamiento del ACV de los duodenoscopios reutilizables, estratificada por el impacto ecológico derivado de cada sustancia	110
Figura 4.32: Acidificación del medio ambiente, en moles de ion hidrógeno equivalentes (mol H ⁺ eq), resultante de la fabricación de un DD-A, estratificada por el impacto ecológico derivado de cada material	110

Figura 4.33: Comparación del impacto medioambiental de la adopción global de duodenoscopios de un solo uso respecto de la estrategia convencional con duodenoscopios reutilizables.....	112
Figura 5.01: Peso relativo del embalaje, mango y cuerpo distal de cada uno de los accesorios de endoscopia	116
Figura 5.02: Análisis instrumental del mango del hemoclip A mediante las técnicas de caracterización térmica DSC y TGA, así como el perfil químico FTIR	117
Figura 5.03: Análisis instrumental del cuerpo metálico de las pinzas de biopsia A mediante la técnica de caracterización combinada FESEM/EDX	118
Figura 5.04: Composición de los materiales de las asas de polipectomía por casas comerciales incluyendo el embalaje. (PE, polietileno; PP, polipropileno; ABS, copolímero de acrilonitrilo butadieno estireno; SS, acero inoxidable).....	119
Figura 5.05: Composición de los materiales de las pinzas de biopsia por casas comerciales incluyendo el embalaje (EVA, etilvinilacetato; PC, policarbonato).....	119
Figura 5.06: Composición de los materiales de los hemoclips por casas comerciales. (PDMS, polidimetilsiloxano)	120
Figura 5.07: Materiales de los accesorios de las distintas casas comerciales según el porcentaje de residuos de alto potencial de calentamiento global (GWP)	121
Figura 5.08: Emisiones de carbono en cada una de las etapas del ciclo de vida de las pinzas de biopsia de las distintas casas comerciales (A, B, C)	123
Figura 5.09: Emisiones de carbono en cada una de las etapas del ciclo de vida de las asas de polipectomía de las distintas casas comerciales (A, B, D)	123
Figura 5.10: Emisiones de carbono en cada una de las etapas del ciclo de vida de los clips hemostáticos de las casas comerciales A y B.....	124
Figura 5.11: Emisiones de carbono evitadas al aplicar la intervención de sostenibilidad “green mark” en las pinzas de biopsia de las diferentes casas comerciales (A, B, C)	127
Figura 5.12: Emisiones de carbono evitadas al aplicar la intervención de sostenibilidad “green mark” en las asas de polipectomía de las diferentes casas comerciales (A, B, D)	128
Figura 5.13: Emisiones de carbono evitadas al aplicar la intervención de sostenibilidad “green mark” en los clips hemostáticos de las diferentes casas comerciales A y B	128
Figura 5.14: Resultados del estudio de intervención de sostenibilidad. Se muestran las diferencias de emisiones de carbono entre la actividad estándar respecto al aplicar la intervención de sostenibilidad	129
Figura 5.15: Resultados de la caracterización de los componentes de los duodenoscopios, por peso y diferentes materiales empleados en la fabricación. (DR, duodenoscopio reutilizable; DD-A y DD-B,	

duodenoscopios desechables; Aleac., aleación; Al, aluminio; Ni, níquel; Cu, cobre; SS, acero inoxidable; PDMS, polidimetilsiloxano; PTFE, politetrafluoroetileno; ABS, acrilonitrilo butadieno estireno; LDPE, polietileno de baja densidad; PC, policarbonato; PET, tereftalato de polietileno; PEU, poliéster-uretano; TPU, poliuretano termoplástico)	131
Figura 5.16: Composición de los materiales de los duodenoscopios en función del potencial de calentamiento global (GWP).....	131
Figura 5.17: Huella de carbono expresada en kgCO ₂ -eq resultante de un ciclo de vida de cada duodenoscopio	133
Figura 5.18: Comparación de sostenibilidad en términos de huella de carbono expresada en kgCO ₂ -eq, resultante del ACV total del DR respecto de la práctica general de CPRE mediante DD.....	135
Figura 5.19: Frecuencias relativas de las emisiones de carbono de cada una de las etapas del ciclo de vida de los duodenoscopios desechables y reutilizables.....	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Listado de los plásticos más estudiados con su densidad y estimación de consumo global	53
Tabla 1.2: Otros indicadores medioambientales utilizados en estudios de sostenibilidad e impacto ecológico	61
Tabla 4.1: Rutas comerciales aproximadas desde los lugares de fabricación	95
Tabla 4.2: Rutas comerciales aproximadas desde los lugares de fabricación de duodenoscopios	107
Tabla 5.1: Peso medio del dispositivo y del embalaje de pinzas, asas y hemoclips.....	115
Tabla 5.2: Emisiones medias en términos de huella de carbono expresada en kgCO ₂ -eq de los accesorios de todas las casas comerciales	122
Tabla 5.3: Resultado de otros indicadores medioambientales por accesorio y casa comercial. (H ⁺ eq iones hidrógeno equivalentes; m ³ , metros cúbicos; kg Sb eq, kilogramos de antimonio equivalentes; kg P eq, kilogramos de fósforo equivalentes; kBq, kilobecquerelios)	126
Tabla 5.4: Resultados de otros indicadores medioambientales de los diferentes duodenoscopios. (mol H ⁺ eq, iones hidrógeno equivalentes; m ³ , metros cúbicos; kg Sb eq, kilogramos de antimonio equivalentes; kg U-235 eq, kilogramos de uranio 235 equivalentes)	134

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Impacto ambiental del sistema sanitario

El cambio climático derivado de la acción humana global es ya una realidad que provoca un impacto en el medioambiente y los ecosistemas, y a largo plazo producirá problemas sanitarios probablemente irreversibles. El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) más relevantes, y se libera a la atmósfera debido a actividades industriales, como el uso de combustibles fósiles, así como a procesos naturales como las erupciones volcánicas o la respiración [1].

La huella de carbono se refiere a la cantidad total de GEI, expresada en equivalentes de dióxido de carbono (CO₂-eq) que es emitida directa o indirectamente por una persona, empresa, evento o actividad a lo largo de su ciclo de vida. Incluye las emisiones de gases como el dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, que contribuyen al cambio climático. Conocer la huella de carbono permite evaluar el impacto ambiental de una actividad y proporciona información valiosa para implementar medidas que reduzcan las emisiones y fomenten la sostenibilidad. Los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), atrapan el calor en la atmósfera y contribuyen al aumento de la temperatura global del planeta. Cuando hay un exceso de estos gases en la atmósfera, se intensifica el efecto invernadero, lo que provoca un aumento en las temperaturas promedio. Este fenómeno ha llevado al cambio climático y a eventos climáticos extremos, como olas de calor, sequías e inundaciones. [2].

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, del inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que, a no ser que se produzcan acciones de forma inmediata, las emisiones de efecto invernadero conllevarán un aumento de las temperaturas este siglo de alrededor de 4-5°C, con la alteración de la biodiversidad que ello supone [3]. El Informe Especial del IPCC del año 2019 sobre el calentamiento global, ya indicó que la temperatura global había aumentado aproximadamente 1 °C por encima de los niveles preindustriales, y advirtió de los graves impactos ambientales que podrían ocurrir si la temperatura global supera los 1,5 °C. Estos cambios suponen un aumento del nivel del mar, que conlleva alteraciones de la biodiversidad fatales, como inundaciones costeras, salinización de aguas

I. INTRODUCCIÓN

subterráneas, cambios en la reproducción de especies marinas e incluso desplazamiento humano de comunidades. Desde 1901, el nivel del mar ha aumentado 1,7 mm por año aproximadamente. Desde la década de 1990, el aumento ha sido más rápido, hasta alrededor de 3,3 mm por año. Por último, el informe del IPCC pronostica que todas las regiones experimentarán cambios climáticos concurrentes y múltiples, previendo un aumento de eventos climáticos extremos, como olas de calor, inundaciones y sequías, con impactos más significativos por encima de 2 °C o más de calentamiento global. También se advierte sobre eventos de baja probabilidad pero alto impacto, como colapsos de capas de hielo y cambios abruptos en la circulación oceánica [3]. Para impedir que el calentamiento global supere las temperaturas preindustriales en más de 1,5 °C, se necesitan bajadas del 7,6 % del total de emisiones de GEI durante la próxima década [4]. En el Acuerdo de París, ratificado por la mayoría de los países del mundo en diciembre de 2015, se estableció un esfuerzo global para abordar el cambio climático en base a tres puntos básicos: los países han de presentar metas voluntarias para reducir sus GEI; cada cinco años se ha de evaluar el progreso de estas metas y dotar a los países en desarrollo de medios para adaptarse al cambio climático.

El cambio climático produce un impacto muy lento pero progresivo en la salud integral del ser humano y el resto de especies. Las altas temperaturas y la contaminación ambiental actúan de forma sinérgica y son nocivos para la salud física y mental, siendo el cambio climático un motor que puede producir un aumento en la morbilidad derivada del infarto de miocardio, enfermedades infecciosas, así como exacerbación de patologías cardiovasculares y respiratorias [5].

Los sistemas sanitarios contribuyen significativamente a la huella de carbono mundial, ya que representan el 4,4 % de las emisiones totales de GEI en todo el mundo [6]. En Reino Unido, el Servicio Nacional de Salud (NHS) es responsable del 5,4 % de las emisiones de carbono [7]. En la línea de reducir estas emisiones, la aplicación de la Ley de Cambio Climático de 2008 ha supuesto una reducción del 62 % de la huella de carbono en este país, pasando de 16,2 millones de toneladas métricas de CO₂ equivalentes (MtCO₂-eq) en 1990, a 6,1 MtCO₂-eq en 2020, lo que equivale a su cuota actual del 4 % del total de emisiones del país. En términos relativos, estas emisiones provienen, en el entorno sanitario, principalmente de la cadena de suministro (62 %), la atención sanitaria (24 %) y los

desplazamientos al hospital y centros de salud (10 %), tal y como se muestra en la Figura 1.1 [8].

Por otro lado, los Estados Unidos de América (EEUU) emplean el 18 % de su producto interior bruto en los gastos derivados de sanidad (4 trillones de dólares en 2020), y estiman que este sector emite un 8-10 % de GEI respecto al total de emisiones de todos los grupos industriales [9], y proporcionalmente se atribuye a la atención hospitalaria un 39 % y a las prescripciones farmacéuticas un 14 % [10].

Otros países como Australia en 2014 (35.772 KtCO₂-eq, 7 % del total de emisiones) [11], China en 2012 (315 MtCO₂-eq, 2,7 % del total de emisiones) [12] o Japón en 2015 (72 MtCO₂-eq, 4,6 % del total de emisiones) [13] han publicado el impacto medioambiental de sus sistemas sanitarios. En los sistemas sanitarios de EEUU, Reino Unido, Canadá y Australia se estiman unas emisiones conjuntas totales de 748 MtCO₂-eq anuales [14]. Si los sistemas sanitarios de todo el mundo se consideraran un país, éste sería el quinto emisor mundial.

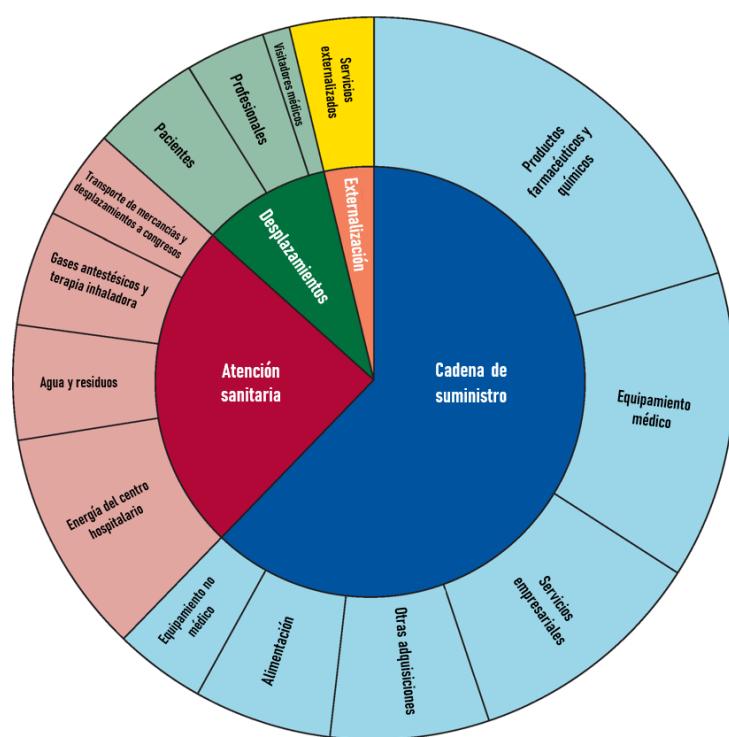


Figura 1.1: Proporción de emisiones de gases efecto invernadero en el entorno hospitalario. Adaptado de [8].

1. INTRODUCCIÓN

En el medio hospitalario, dependiendo del país, eficiencia energética, medios de transporte más frecuentes y uso de dispositivos reutilizables o desechables, entre otros factores, tenemos diferentes variables que aportan una mayor contribución al impacto medioambiental y la huella de carbono. De forma general, la energía (30-40 %), transporte y desplazamientos (10-20 %), y la producción de materiales y tratamiento de residuos (20 %) son los principales responsables de emisiones de GEI. No obstante, también contribuyen otras actividades como el sector de la alimentación, el uso de agua, el empleo de gases refrigerantes por dispositivos médicos, entre otros. [15, 16].

En un estudio sobre las emisiones derivadas del sistema sanitario de Australia, dentro de las diferentes estructuras del sistema sanitario, la mayoría de las emisiones corresponden a los hospitales públicos (34 %) y privados (10 %), los gastos en industria farmacéutica (19 %), servicios de médicos especialistas (6 %), sanidad pública (6 %) y atención primaria (4 %) (Figura 1.2). Les siguen otros grupos como clínicas dentales, investigación, administración, entre otros. [11].

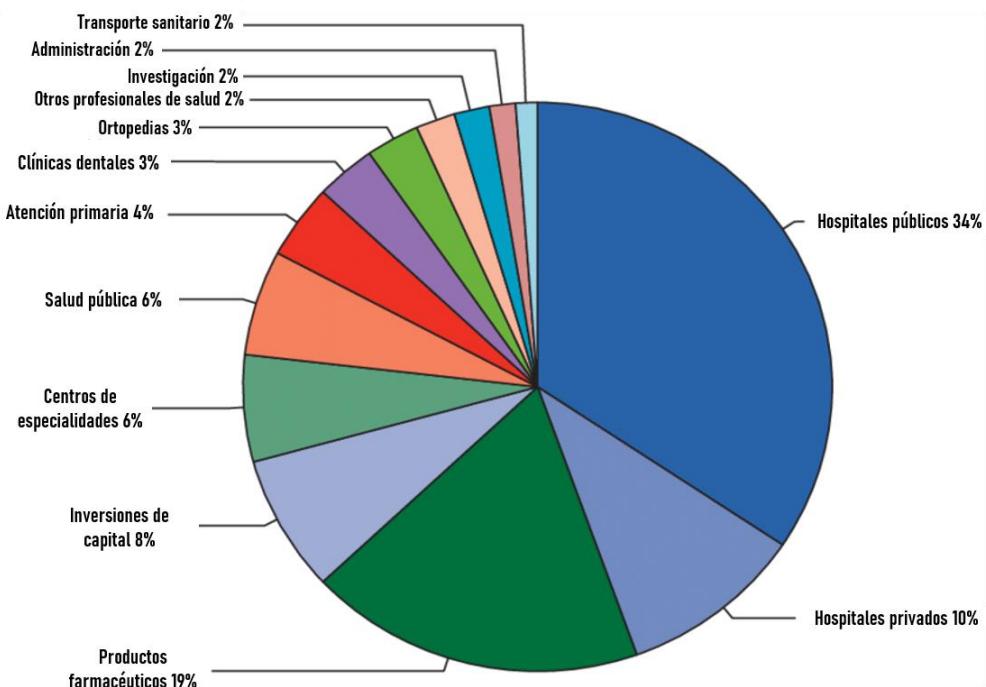


Figura 1.2: Representación del impacto medioambiental de los diferentes departamentos e instituciones dentro del sistema sanitario de Australia. Adaptado de [11].

A medida que los efectos en la salud provocados por el cambio climático se vuelven más evidentes, los sistemas sanitarios están trabajando intensamente para enfrentarse al cambio climático, especialmente en naciones en desarrollo [17]. Sin embargo, además de preparar los sistemas de salud para el cambio climático, también hay que preocuparse por el impacto medioambiental que supone el propio sector de la salud. Mientras que otras industrias han tenido que modificar su actividad, en base a cambios en la legislación para mitigar su contribución al cambio climático, el impacto del sector de la salud ha sido en gran medida ignorado, principalmente debido a la naturaleza del servicio que proporciona. Afortunadamente, este pensamiento ha comenzado a cambiar, especialmente con la creciente comprensión de los efectos perjudiciales de la atención médica en relación al alto consumo de recursos, desplazamientos, residuos, etc [18].

En los últimos años, la atención de los responsables políticos se ha centrado en los desafíos crecientes de la sostenibilidad ambiental, impulsados por el aumento de la población global, la escasez de recursos y el incremento de residuos. Existe una necesidad de cambiar las políticas multisectoriales para abordar el agotamiento de recursos a nivel mundial. En este sentido, podemos distinguir dos modelos económicos opuestos: la economía lineal, que convierte recursos en residuos, y la economía circular, que busca minimizar el impacto ambiental mediante la eficiencia en el uso de recursos. La economía circular, basada en la reducción, reutilización, recuperación y reciclaje de materiales, promueve un desarrollo sostenible y un equilibrio entre sociedad, medio ambiente y economía [19]. El concepto de economía circular en el ámbito del sistema sanitario aborda la sostenibilidad al reducir el uso de recursos, gestionar adecuadamente los residuos y disminuir las emisiones de GEI.

El cálculo de la huella de carbono obtenido de forma estratificada da una visión sobre el impacto ambiental de los sistemas de salud, identificando áreas específicas que tengan un mayor impacto a nivel global. Para intentar reducir la huella de carbono y fomentar la sostenibilidad, sistemas sanitarios como el inglés, NHS, ha implementado estrategias como el aumento de la energía renovable in situ, proyectos de eficiencia hídrica, uso de ambulancias eléctricas, políticas de adquisición de productos con baja huella de carbono, eliminación de propelentes de clorofluorocarbono (CFC) en inhaladores e inversión en tecnologías sostenibles [8]. Además, el desglose de la huella de carbono ha

1. INTRODUCCIÓN

permitido a los investigadores realizar análisis más detallados del impacto ambiental en áreas específicas de la atención médica, proponiendo intervenciones para reducir la huella de carbono en disciplinas múltiples.

Es necesario que todos los países calculen la huella de carbono de sus sistemas de salud para implementar medidas específicas que reduzcan dicho impacto. La inversión en medidas para descarbonizar los sistemas de salud generará beneficios financieros y ambientales a largo plazo. Todos los ámbitos de la sociedad deben enfrentarse a cambios para mitigar el impacto medioambiental, y el sistema sanitario debe ser un pilar en el proceso, tanto por ser un intenso productor de emisiones como por representar una herramienta clave en la prevención y tratamiento de enfermedades derivadas del cambio climático.

1.2. Gestión de residuos en el medio hospitalario y en la unidad de endoscopia digestiva

Las altas emisiones de GEI del sistema sanitario derivan de muchos factores, entre ellos los materiales y dispositivos de uso médico desechables, cuyo uso ha aumentado notablemente en los últimos años en el ámbito sanitario, para ahorro de costes, seguridad y reducción de la transmisión de infecciones. Sin embargo, el uso de instrumentos desechables aumenta los residuos y supone un esfuerzo importante en su tratamiento (vertederos, incineración, reciclaje). Esta producción de residuos se traduce en riesgos para la salud pública y el medio ambiente, por ello es necesario realizar un gran esfuerzo en la segregación efectiva de residuos peligrosos y no peligrosos, no solo para reducir estos riesgos, sino también para disminuir los costes asociados con la gestión de residuos.

En el sistema sanitario de Inglaterra, en el año 2015 se recogieron 195.734 toneladas de residuos, con un coste derivado de unos 33 millones de libras. Se estima que la adecuada segregación de los residuos en sus diferentes categorías, con la reducción en residuos considerados realmente como peligrosos, podría suponer un ahorro de entre 3 y 5 millones de libras [20].

La pandemia por COVID-19 ha multiplicado drásticamente el uso de material desechable con los equipos de protección individual (EPI), por lo que el impacto medioambiental de las instituciones sanitarias se ha disparado [21]. Al principio de la

pandemia, la disminución de la actividad económica y la reducción de la movilidad humana resultaron en una disminución temporal de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en las grandes ciudades [22]. Sin embargo, esta reducción ha sido temporal y no ha tenido un impacto significativo a largo plazo en la huella de carbono.

En términos directos, la respuesta global a la pandemia ha requerido un aumento en el uso de recursos médicos, una mayor producción de EPI, y un considerable aumento en el transporte de pacientes y suministros médicos, lo que globalmente ha contribuido a un incremento relevante en la huella de carbono.

Muchos de estos materiales desechables utilizados para protección individual, son de un solo uso y están compuestos de polímeros orgánicos que llamamos comúnmente plásticos, y sabemos que el 10 % de estos plásticos producidos a nivel global terminan en el fondo de los océanos, donde permanecerán más de 500 años [23], lo que supone un enorme problema añadido.

En el océano, los plásticos se fragmentan en pequeñas partículas conocidas como microplásticos, que pueden ser ingeridos por los animales marinos dañando sus sistemas digestivos y causando efectos tóxicos. De esta forma pueden propagarse y acumularse en la cadena alimentaria. Además, los plásticos pueden liberar sustancias nocivas a los organismos marinos y su hábitat, como bisfenol A y ftalatos que interfieren con las hormonas. Por lo tanto, es importante reducir el uso de plásticos y fomentar la gestión responsable de los residuos plásticos para proteger la salud de los océanos y su biodiversidad [24].

En la actualidad, debido al avance de las técnicas de intervencionismo gastrointestinal, las salas de endoscopias digestivas funcionan como quirófanos, ya que son áreas muy intensivas en consumo de recursos (Figura 1.3). Esto se debe al funcionamiento simultáneo de dispositivos electrónicos (respiradores, monitores y unidades de electrocoagulación), la acumulación de desechos (medicamentos, material fungible y EPI) y residuos biológicos con tratamiento de residuos especializado. A esto se suma el procesado, limpieza y desinfección de los endoscopios, el constante transporte de pacientes, profesionales de la salud y material. La pandemia COVID-19 cambió el panorama al restringir las intervenciones endoscópicas programadas, aumentando la seguridad frente al contagio de los pacientes y el personal, con el uso de EPI [25]. Aunque el volumen de endoscopias disminuyó, la huella de carbono de cada intervención aumentó significativamente. Al

1. INTRODUCCIÓN

moderarse el impacto de la pandemia y reactivar el acceso de intervenciones endoscópicas, la necesidad de realizar procedimientos de forma inminente se ha multiplicado exponencialmente, y hemos mantenido estas medidas de protección por lo que el impacto medioambiental de la endoscopia se ha disparado, especialmente por el aumento de residuos.

Concretamente, la unidad de endoscopia digestiva constituye el tercer productor de residuos en el medio hospitalario, después del área de quirófano y de las unidades de enfermos críticos [26]. Estas tres unidades pueden consumir, en términos de kilogramos de residuos por día y cama de hospital, unos 5,96, 3,37 y 3,07 kg, respectivamente [27]. Se estima que los residuos plásticos pueden llegar hasta 1,5 kg por procedimiento, si bien de estos únicamente 0,3 kg son realmente reciclables [28].



Figura 1.3: Sala de endoscopia intervencionista, con presencia de pantallas para visualización endoscópica y radiológica, procesadores de endoscopia y ecoendoscopia, torre de electrocoagulación, arco en C de Rayos X, dispositivos de ventilación y anestesia, monitores de constantes vitales, bombas de perfusión.

La correcta gestión de residuos sanitarios, mediante su clasificación y normalización, no solo mitiga riesgos para la salud y el medio ambiente, sino que también

minimiza costes. El uso excesivo de materiales desechables ha incrementado la generación de residuos, ya que es necesario fomentar su empleo en situaciones de riesgo de infección.

En el entorno hospitalario, se generan diversos tipos de residuos, que podemos clasificar en:

- a. Residuos sanitarios asimilables a municipales (tipo I),
- b. Sanitarios no específicos (tipo II),
- c. Sanitarios de riesgo (tipo III) y
- d. Residuos tipificados en normativas singulares (tipo IV) (Figura 1.4).



Figura 1.4: Contenedores de residuos sanitarios de riesgo tipo III (A y B), y residuos citotóxicos y citostáticos tipo IV (C).

Estos últimos no suelen ser frecuentes en las unidades de endoscopia, ya que agrupan a residuos citostáticos, químicos y radioactivos. En cambio, los residuos sanitarios de riesgo sí son habituales en las unidades de endoscopia digestiva, ya que incluyen residuos sanitarios infecciosos, anatómicos, sangre y hemoderivados, agujas y material punzocortante [29].

Los residuos sanitarios peligrosos y los materiales punzocortantes requieren contenedores específicos para prevenir riesgos biológicos y lesiones. Además, los residuos generales deben segregarse adecuadamente, fomentando el reciclaje. El almacenamiento temporal se realiza en áreas designadas. El transporte a instalaciones especializadas garantiza una eliminación o tratamiento adecuado, minimizando impactos ambientales y

I. INTRODUCCIÓN

riesgos para la salud. La implementación de protocolos eficaces en la gestión de residuos hospitalarios es esencial para mantener estándares de seguridad y sostenibilidad [29].

Por ello, la gestión de residuos biomédicos (RBM) debe estar estrictamente protocolizado. La incineración en el mismo hospital donde se generan los residuos, opción tradicionalmente empleada, ha quedado relegada a un segundo plano debido a la obsolescencia de los incineradores y a las directivas más estrictas de la Unión Europea sobre emisiones de gases. La modernización de incineradores requiere tecnología especializada, planteando dificultades en operación y mantenimiento para los centros sanitarios [29]. Según la legislación vigente europea, el tratamiento de RBM (residuos anatómicos, agujas y cuchillas, restos de fármacos, desechos clínicos y residuos citotóxicos o citostáticos) es la incineración a alta temperatura ($>1100^{\circ}\text{C}$). La incineración se presenta como favorable dado que reduce el desecho a un 10% de su peso original, por lo que teóricamente disminuye el volumen de residuos que llegan a los vertederos. Sin embargo, la incineración a alta temperatura es un proceso de combustión térmica controlada que transforma los residuos en gases y materiales inertes, que suponen un riesgo medioambiental al producir contaminación de aguas subterráneas y migración de metales pesados [30]. Además, constituye la vía más contaminante y la de mayor huella de carbono en la gestión de residuos, con emisiones de 1074 kgCO₂-eq por tonelada de residuos sanitarios incinerada [16]. No obstante, la incineración puede optimizarse para generar energía y disminuir el impacto medioambiental, mediante un proceso de aprovechamiento energético de residuos, EfW (del inglés *Energy-from-Waste*).

La incineración EfW es un proceso de generación de electricidad a partir de la combustión de residuos no reciclables. Consiste en capturar y transformar el calor derivado de la incineración para producir vapor y generar electricidad [16]. La energía generada de la incineración de residuos depende del valor calorífico de los desechos, la eficiencia de la incineración y la tecnología empleada para la recuperación de energía. Los RBM suelen tener un valor calorífico superior al de los residuos sólidos municipales, con una producción de energía que varía entre 750 y 1000 kWh por tonelada de residuos incinerados en los sistemas de recuperación de energía [31]. La implementación de estas estrategias de ahorro energético en el medio sanitario supondría un importante desarrollo sostenible y una reducción considerable del impacto medioambiental.

Los residuos en la unidad de endoscopia digestiva se dividen en residuos generales, reciclables y biomédicos. Sin embargo, la mayoría de las unidades de endoscopia no están equipadas con contenedores de reciclaje, lo que conduce a la eliminación de residuos únicamente en dos grupos, residuos generales que terminan en vertederos, y los RBM, que deben ser incinerados. La segregación adecuada de residuos, la concienciación de los profesionales y las políticas sanitarias que favorecen reciclaje constituyen estrategias de sostenibilidad en endoscopia que se han explorado recientemente [32]. Sin embargo, la falta de conciencia por parte de la mayoría del personal sobre los gastos, impacto ambiental y la correcta categorización de los residuos endoscópicos es la barrera principal para el reciclaje. Cada procedimiento de endoscopia genera aproximadamente una media de hasta 2,1 kg de residuos, que se dividen en residuos generales (63 %), biomédicos (28 %) y reciclables (9 %) [33]. Además, la implementación de medidas fáciles de aplicar, como la formación del equipo en materia de manipulación, segregación y eliminación de residuos, pueden reducir las emisiones de carbono en un 31,6 % [26].

Cuando este volumen de residuos se aplica al número anual de endoscopias en los Estados Unidos, que asciende a 22 millones de procedimientos, el total de residuos de las unidades de endoscopia sería equivalente al peso de 30.000 automóviles de pasajeros y cubriría aproximadamente 150 campos de fútbol a una profundidad de 1 metro [34, 35]. Según estimaciones previas, la proporción de residuos que realmente se recicla es baja (10 %), mientras que cerca del 50 % de residuos depositados en contenedores de RBM son potencialmente reciclables [33], lo que denota una importante necesidad de mejora en la segregación y reciclaje de residuos mediante la educación e instrucción de los profesionales.

1.3. Fuentes de emisiones de carbono en la unidad de endoscopia

Las especialidades médicas en las que se realiza un elevado número de procedimientos invasivos, como cirugía y endoscopia, requieren el uso de gran cantidad de materiales desechables, cuya producción, transporte y consumo de energía conlleva un impacto considerable sobre el medio ambiente.

A nivel mundial, el tamaño del mercado de la endoscopia fue valorado en 10,8 mil millones de dólares estadounidenses en 2020, con un esperado crecimiento anual

1. INTRODUCCIÓN

compuesto del 8 % en los próximos años [36]. De acuerdo con estimaciones recientes del año 2021, el número de endoscopias podría ascender a unos 22 millones de endoscopias anuales en EEUU [34] y más de 2 millones en Reino Unido [37]. En las últimas dos décadas, se han establecido nuevos planes de cribado poblacional de cáncer colorrectal y esofagogástrico, por la evidencia disponible de que el tratamiento de lesiones precancerosas disminuye el riesgo global de muerte por cáncer. Esto ha impulsado un aumento en el número total de endoscopias entre la población asintomática. Existen estudios que demuestran que el cribado de población cada vez más joven es beneficioso a largo plazo, y países como EEUU ya abogan por comenzar el cribado de cáncer colorrectal a personas a partir de los 45 años [38]. El énfasis en la mejora de la calidad en la endoscopia también ha llevado a un mayor descubrimiento de lesiones, procesamiento de más especímenes y una mayor carga de procedimientos de vigilancia [6].

Es por ello por lo que es necesaria una intervención para disminuir el impacto medioambiental de las unidades de endoscopia. Sería recomendable crear estrategias que permitan aumentar el reciclaje, clasificar los residuos adecuadamente y disminuir el porcentaje de RBM, ya que son incinerados a alta temperatura y producen mayor cantidad de emisiones. Para entender la sostenibilidad en endoscopia debemos determinar las diferentes fuentes de emisiones de GEI derivadas de esta actividad.

1.3.1. Consumo de material fungible

En las unidades de endoscopia del mundo Occidental ha habido una transición y desarrollo de los instrumentos y accesorios de diagnóstico y tratamiento hacia dispositivos de un solo uso. El desarrollo tecnológico ha permitido ampliar las competencias de la endoscopia, con un aumento en el número de exploraciones y nuevos abordajes intervencionistas por vía endoscópica de enfermedades que requerían tradicionalmente un tratamiento quirúrgico. Este hecho ha supuesto un incremento exponencial del uso de material fungible, cuyo uso depende del procedimiento, pero en general predominan los de composición de polímeros plásticos, con embalajes individuales y no reciclables. Por cada paciente necesitaremos gafas de oxígeno, dispositivos abreboquas, batas de intimidad para el paciente (en ocasiones desechables) y EPI para el profesional, bolsas para guardar efectos personales y cajas para prótesis dentales. Además, también suelen ser necesarios catéteres de venopunción, apósticos, gasas y empapadores, jeringuillas para administrar medicación, etiquetas y pegatinas para monitorización cardiopulmonar. Por último,

sistemas de aspiración a vacío e insuflación de CO₂, recipientes de histología, y en ocasiones, válvulas y tapones del endoscopio también desechables (Figura 1.5).



Figura 1.5: Material desechable necesario para cualquier exploración endoscópica bajo sedación, sin incluir EPI ni accesorios endoscópicos a través del canal de trabajo.

Dependiendo de la intervención endoscópica, emplearemos pinzas de biopsia, asas de polipectomía, cestas atrapapólipos, así como muchos otros accesorios dependiendo de la terapéutica a realizar. Prácticamente todos estos accesorios de diagnóstico y tratamiento que se introducen por el canal de trabajo del endoscopio son de un solo uso y de desechan tras el procedimiento.

1.3.2. Reprocesamiento de equipos

La limpieza y desinfección de endoscopios reutilizables es crucial para mantener la seguridad frente a infecciones y evitar la contaminación cruzada de microorganismos, que en ocasiones colonizan estos dispositivos. Estos ciclos de desinfección implican diferentes fases: Una primera fase de limpieza mecánica, que incluye succión de detergente enzimático inmediatamente terminado el procedimiento, retirada de válvulas e inmersión en detergente, limpieza de superficies externas y limpieza de los canales de

1. INTRODUCCIÓN

instrumentación mediante un catéter-cepillo. Una segunda fase de desinfección de alto nivel, mediante máquinas específicas de lavado de endoscopios, durante por ejemplo unos 20 minutos a 20 °C, con inmersión en desinfectantes y en productos como el glutaraldehído al 2 % [39]. Y finalmente, la última fase incluye el aclarado con agua estéril para retirar restos de desinfectante, secado manual y almacenamiento adecuado. Las máquinas de desinfección, lavado y secado de endoscopios se muestran en la Figura 1.6. Como es evidente, este nivel de reprocesamiento requiere grandes cantidades de agua, electricidad, calor, desinfectantes y detergentes. Cada máquina de lavado de endoscopios consume aproximadamente 24,67 kWh/día, equivalente a 0,017 tCO₂-eq/día [6]. Por ciclo de desinfección, aproximadamente se utilizan 91 litros de agua, 0,33 kWh de potencia energética y hasta 1 litro de detergentes y desinfectantes [33].



Figura 1.6: Máquinas de desinfección y lavado de endoscopios (A y B) y armarios de secado (C)

1.3.3. Utilización operativa de recursos

Una unidad de endoscopia demanda electricidad para procesadores, endoscopios, monitores y ordenadores, alumbrado y climatización. El consumo eléctrico representa del 10 % al 30 % del impacto ambiental de individuos y sistemas de salud [40]. Además, existe un elevado consumo de agua, habitualmente agua estéril embotellada, sobre todo en colonoscopia, que puede llegar, en exploraciones realizadas en inmersión, hasta una media de 700 mL por procedimiento [41]. La limpieza sucesiva entre pacientes de las salas de

endoscopia y el empleo de gases de uso médico, como el CO₂, óxido nitroso, desflurano o sevoflurano también contribuyen notablemente a la huella de carbono [6].

1.3.4. Gastos derivados de la administración

Cada procedimiento conlleva una carga administrativa significativa, como cartas impresas, recordatorios, envío postal de preparación intestinal e incluso pruebas de detección de COVID-19. Después del procedimiento, a menudo se imprimen varias copias de informes de endoscopia para el registro del hospital, la información para el paciente y un informe para el médico peticionario (Figura 1.7). Las solicitudes de histología suelen acompañarse de un formulario dirigido al médico especialista en anatomía patológica [6]. En principio, la transición a la digitalización hace reducir la impresión y consumo de papel, pero en ocasiones puede conducir a aumentos significativos del impacto medioambiental. Por ejemplo, imprimir un informe de endoscopia en papel reciclado y enviarlo por correo a un destinatario podría generar alrededor de 5-10 gCO₂-eq, mientras que enviar un correo electrónico con archivo pesado como adjunto (como varias imágenes digitales) podría generar hasta 50 gCO₂-eq [42]. Este hecho desvela que el almacenamiento digital de los datos no está exento de impacto medioambiental y se pronostica que representará el 14 % de la huella de carbono global para 2040 [43].

1.3.5. Desplazamientos y viajes

Los desplazamientos de los pacientes y los profesionales a la unidad son una fuente evidente de GEI y contribuyen a la huella de carbono general, y se ha estimado que puede llegar a representar el 45 % del total del impacto medioambiental de una unidad de endoscopia digestiva [44]. Fomentar el uso de transporte público en ciudades y mejorar la accesibilidad de los hospitales reduce en gran medida este impacto. Nuevas medidas como la valoración preanestésica mediante videollamada y el consentimiento informado por vía electrónica empiezan a implementarse en diversos centros hospitalarios [6].



Figura 1.7: Registro físico de informes de endoscopia terapéutica almacenados a lo largo de los años en una Unidad

1.4. Sostenibilidad en endoscopia digestiva o *Green Endoscopy*

La endoscopia verde o *Green Endoscopy* se ha definido recientemente como una disciplina que promueve la creación de conciencia, evaluación y reducción del impacto medioambiental de la endoscopia digestiva. Persigue múltiples estrategias para disminuir los residuos y readaptar el equipamiento y material fungible en la Unidad de Endoscopias en beneficio de los pacientes, los centros sanitarios y la comunidad [45].

Por otro lado, podemos definir la sostenibilidad como un proceso dinámico que garantiza la persistencia de los sistemas naturales y humanos de manera equitativa. El desarrollo sostenible satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras, y equilibra las preocupaciones sociales, económicas y ambientales [46]. Los principios de la atención médica sostenible incluyen el empoderamiento del paciente, la prevención, los servicios eficientes y las alternativas de bajo impacto en la huella de carbono [47]. La sostenibilidad puede ser considerada como parte integral de la atención médica de calidad. De hecho, varias organizaciones de atención médica ya han incorporado la sostenibilidad como un dominio principal en su marco conceptual de calidad [48].

La *Green Endoscopy* aboga por reducir el impacto medioambiental a todos los niveles, desde la apropiada indicación del procedimiento, el uso de recursos materiales, consumo de energía y tratamiento de residuos antes, durante y después de la endoscopia. Estas medidas incluyen las siguientes actividades.

1.4.1. Reducción del número de exploraciones inapropiadas en base a las guías de práctica clínica

Durante la pandemia COVID-19 se redujo considerablemente el número de procedimientos realizados, y se llevaron a cabo aquellos estrictamente necesarios e indicados. Esto es debido a que parte de la labor de los endoscopistas era determinar la adecuación de la prueba, ya que en el momento de alerta epidemiológica estaba totalmente justificado. Algunas medidas para reducir el número de procedimientos son fundamentales, como es el caso de indicar adecuadamente los seguimientos endoscópicos tras resección de pólipos, ya que algunos estudios estiman que hasta el 20-30 % de las gastroscopias y colonoscopias de seguimiento son inapropiadas [48, 49]. En este sentido, se han propuesto guías de práctica clínica específicas para determinar la vigilancia endoscópica, que esperan reducir el número de colonoscopias de seguimiento hasta en un 80 % [49, 50]. Otra forma de reducir las exploraciones endoscópicas puede ser, cuando esté indicado, intercambiarlas por otras pruebas más adecuadas para el perfil del paciente: En pacientes jóvenes con dispepsia, se puede abogar por utilizar previamente test no invasivos para *H. pylori* (test de aliento, antígeno fecal) en vez de gastroscopia [51]. En el caso de screening de hipertensión portal, el uso de la elastografía de transición y el recuento de plaquetas ha demostrado ser suficiente para confirmar hipertensión portal clínicamente significativa y evitar gastroscopias innecesarias [52]. En el caso de colonoscopias, en pacientes con diarrea sin datos de alarma o seguimiento de enfermedad inflamatoria intestinal, una determinación de calprotectina fecal normal pueden evitar el procedimiento [53]. Otro ejemplo es el uso de la prueba inmunohistoquímica de sangre oculta en heces como cribado de cáncer colorrectal en personas asintomáticas o como método de cribado en pacientes sintomáticos en el entorno de atención primaria [54]. Limitando el número de exploraciones a las estrictamente necesarias, aumentamos la relación de coste-efectividad y reducimos el riesgo de complicaciones (derivadas de la sedación o inherentes al procedimiento, como perforación gastrointestinal, hemorragia e infección).

1.4.2. Reducción del uso de medicación y otras medidas evitables

Revisar la estricta necesidad de pruebas diagnósticas o la medicación empleada antes y después de la endoscopia, puede reducir la huella de carbono. Realizar un extenso preoperatorio a todos los pacientes con analíticas, electrocardiogramas o radiografías quizá no sea necesario. Tampoco el uso indiscriminado de sistemas de alargaderas de administración intravenosa y suero fisiológico en perfusión durante todas las sedaciones, así como la antibioterapia y los antiinflamatorios no esteroideos antes y después de cualquier colangiopancreatografía retrógrada endoscópica (CPRE). En el caso de la CPRE, es importante adecuar el uso de antibióticos a la indicación, ya que varía dependiendo de diversos factores como la presencia de esfinterotomía previa, estar colecistectomizado o haber conseguido o no un drenaje adecuado de la vía biliar [55]. En relación a la sedación, no existen estudios comparativos al respecto, pero es lógico pensar que aquellos procedimientos ambulatorios y en pacientes de bajo riesgo, en especial la colonoscopia (donde la vía aérea está menos comprometida), la sedación guiada por el endoscopista con enfermería entrenada es segura, disminuye costes y probablemente reduzca la huella de carbono [56]. También parece evidente pensar que, en medida de lo posible, los procedimientos de endoscopia avanzada del tracto digestivo superior (CPRE, ecoendoscopia, dilataciones de estenosis, prótesis enterales), pueden realizarse con sedación profunda y así evitar la anestesia general [57]. De ese modo, se reducen los materiales y costes derivados de la intubación orotraqueal, y por tanto se promueve la sostenibilidad. Fomentar la telemedicina, en escenarios tan frecuentes como la evaluación preanestésica de pacientes de bajo riesgo [58], o consultas médicas para comunicar resultados de anatomía patológica y programar el seguimiento endoscópico [59], parecen medidas razonables para disminuir los desplazamientos al centro hospitalario y así las emisiones de GEI.

1.4.3. Adaptación del uso de recursos en la sala de endoscopia

La unidad de endoscopia digestiva genera un elevado número de muestras para análisis en anatomía patológica (por biopsias de cada tramo del tracto digestivo, polipectomías cada una en un frasco de anatomía patológica, Figura 1.8). La producción y

manejo de estas muestras y especímenes de anatomía patológica puede optimizarse para reducir la huella de carbono sin alterar clínicamente el proceso diagnóstico ni el pronóstico del paciente [60, 61]. Reducir el número de frascos de anatomía patológica es una medida simple y eficaz, sobre todo gracias al desarrollo de la tecnología, con el avance de los endoscopios de alta definición, la cromoendoscopia virtual, la inteligencia artificial y la endocitoscopia. Se ha reportado evidencia fehaciente de que puede estimarse con alta sensibilidad y especificidad la ausencia de malignidad mediante el diagnóstico óptico, en profesionales entrenados y con la tecnología adecuada, antes del análisis histopatológico [62-64], y así optimizar el uso de recursos. Este avance permite agrupar todos los especímenes de polipectomía de los mismos tramos del colon en un mismo frasco, y en el futuro podría conducir a resecar y evitar el análisis histopatológico de lesiones benignas mediante la estrategia resecar y descartar (del inglés “*resect and discard*”) [65].

Realizar un uso racional de los accesorios de endoscopia contribuye a disminuir los residuos. Medidas tan sencillas como seleccionar adecuadamente los pacientes que se benefician del cierre de una escara de polipectomía con clips, el uso de una misma pinza de biopsia para exploraciones dobles (gastroscopia y colonoscopia), fomentar el uso de asa fría (sin consumo de torre de electrocoagulación ni almohadilla de conducción) y la mucosectomía en inmersión (evitando el consumo de aguja de inyección, suero fisiológico, índigo carmín) contribuyen a reducir el consumo de material fungible [6, 48, 66].



Figura 1.8: Muestras de anatomía patológica de pólipos de colon en una sola sesión de colonoscopias programadas

El uso de agua estéril o agua potable es controvertido. El alto consumo de agua embotellada estéril presenta sin duda un impacto medioambiental tanto por el uso de recursos como por la huella de carbono que supone la esterilización y el embotellado [67]. Dada la preocupación por la infección en pacientes seleccionados, el agua estéril se ha postulado como fuente de agua principal, especialmente para aquellos procedimientos con previsión de atravesar la mucosa del tracto digestivo [68]. Sin embargo, la mucosectomía en inmersión y la inserción del colonoscopio con irrigación de agua se han realizado utilizando agua potable limpia sin problemas de seguridad [69, 70]. Por lo tanto, la idea de una necesidad universal de agua estéril merece ser reconsiderada y se deben diseñar estudios que evalúen el verdadero riesgo de infección clínicamente relevante, el coste y las preocupaciones ambientales [48].

1.4.4. Logística sostenible en la unidad de endoscopia

Todos los factores que afecten al consumo energético, la producción de materiales y los transportes con combustibles fósiles van a contribuir al impacto medioambiental de la unidad de endoscopia digestiva. Una correcta programación y planificación de la adquisición del material fungible, así como controles continuos de su disponibilidad evita que los accesorios de endoscopia caduquen y se hagan inservibles (Figura 1.9).



Figura 1.9: Accesorios fungibles de uso endoscópico una vez superada su fecha de caducidad, presentes en una unidad de endoscopia digestiva.

En conjunción con los departamentos de compras de los centros hospitalarios, las unidades deben procurar adquirir fungible que favorezca el consumo de proximidad, para evitar transporte de mercancías de larga distancia y favorecer el comercio, si no local, al menos continental. Otras medidas, como el uso razonable de la climatización [71], las energías renovables, la digitalización [72], la adecuada segregación de residuos con fomento del reciclaje [27], y el uso eficiente de dispositivos electrónicos contribuyen a disminuir el impacto medioambiental.

1.5. La sostenibilidad como protocolo de trabajo

El estudio de la sostenibilidad en sanidad es emergente, y aún son escasos los estudios bien diseñados, homogéneos y que sean reproducibles. Otras disciplinas médicas han realizado análisis de sostenibilidad de sus materiales. En este sentido, un estudio en el área de ginecología constata que el empleo de espéculos vaginales desechables genera hasta 4 veces más emisiones de carbono (kgCO₂-eq) que otros reutilizables, independientemente del tipo de material y del modo de desinfección y reprocesamiento [73]. Una operación de neurocirugía supone una media de 8,91 kg de desecho, y tiene unas emisiones de carbono de unos 24,5 kgCO₂-eq (equivalentes a producir unas 400 botellas de plástico) [74].

En el campo de la endoscopia digestiva también se han realizado análisis y estimaciones de sostenibilidad. Un estudio estimó la huella de carbono derivada de los especímenes de anatomía patológica, con hasta 0,28 kgCO₂-eq por cada frasco de anatomía patológica, lo que equivale a las emisiones de conducir 1 km con un vehículo convencional [60]. En un trabajo publicado por un grupo de investigación en Estados Unidos estimó el consumo energético de una unidad de endoscopia que realiza unas 40 exploraciones endoscópicas al día. Los resultados resaltaron que la iluminación fue lo que más contribuyó al consumo energético, con 47,88 kWh, mientras que le siguieron las máquinas de desinfección (27 kWh), los procesadores de los endoscopios (24,67 kWh) y los dispositivos de anestesia (12 kWh) [28].

Los resultados de una encuesta internacional a 407 profesionales que realizan endoscopia digestiva resaltan que las intervenciones de sostenibilidad que reducirían el impacto medioambiental serían la indicación adecuada de los procedimientos (41 %) y la reducción del uso de accesorios endoscópicos desechables (34 %). Prácticamente todos los encuestados (94 %) coinciden en que debería realizarse una adecuada segregación y

1. INTRODUCCIÓN

reciclaje de residuos, si bien la mitad indica no haber sido formado ni tener conocimientos específicos para hacer una segregación adecuada [75].

Uno de los estudios mejor diseñados sobre la evaluación de la huella de carbono en endoscopia digestiva, reveló que la principal fuente global de emisiones en un centro de endoscopia ambulatoria son los desplazamientos (45 %) y el equipamiento médico, en el que consideraron tanto endoscopios, como máquinas de desinfección, torres de procesamiento, monitores, respiradores y torres de electrocoagulación (32 %). La energía, el fungible y los residuos tuvieron un papel secundario (Figura 1.10). Se estimó que, de forma global, y contando todas las etapas del ciclo de vida, en un centro en el que se realizan unos 8.500 procedimientos anuales, las emisiones anuales fueron de 282 tCO₂-eq, por lo que una exploración endoscópica equivale a 28,4 kgCO₂-eq [44].

Estos resultados constatan la importancia de abordar la sostenibilidad en endoscopia digestiva de forma preferente. Por el momento, la industria no ofrece datos de huella de carbono ni análisis de ciclo de vida (ACV) de sus productos (procesadores de endoscopia, material fungible y endoscopios), únicamente el importe económico.

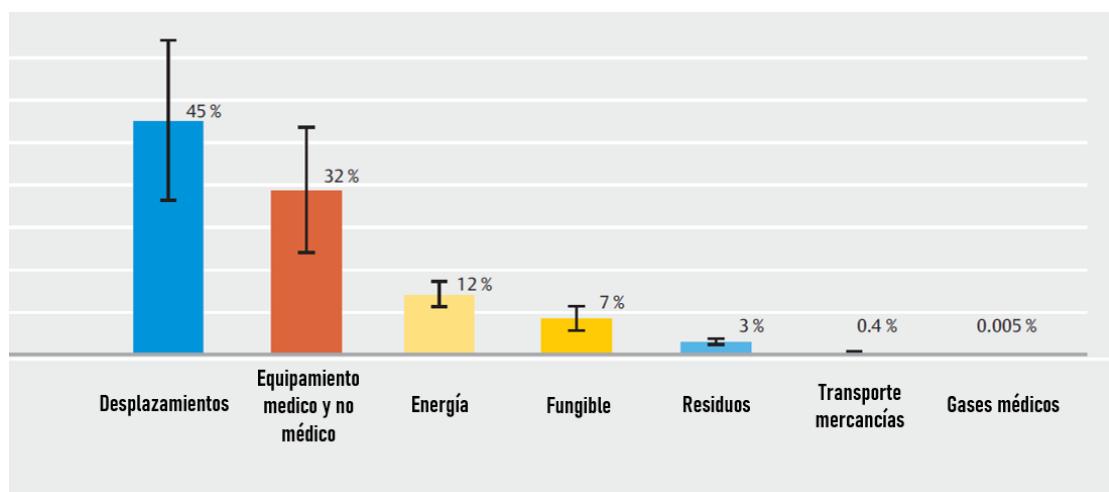


Figura 1.10: Contribución en emisiones de efecto invernadero de las diferentes actividades necesarias para el funcionamiento de una unidad de endoscopia. Las líneas verticales representan el porcentaje de incertidumbre. Adaptado de [44]

Una de las medidas que se han propuesto, para dirigir la toma de decisiones clínicas, de gestión y en favor de la sostenibilidad, es el etiquetado medioambiental de los productos,

con información sobre los materiales empleados y su huella de carbono [76]. El concepto de etiquetado ecológico ha ganado cierto protagonismo gracias al aumento de la sensibilización medioambiental por parte de la población general, y numerosas industrias, como las alimentaria y textil, realizan análisis medioambientales de sus productos y proporcionan los resultados a sus clientes (Figura 1.11) [77]. Esta medida no está extendida en la industria vinculada con la atención sanitaria, y podría mejorar significativamente la comercialización de productos, facilitando a las instituciones sanitarias la elección de opciones más sostenibles.

1.6. Material fungible en endoscopia digestiva

Los instrumentos o accesorios en endoscopia digestiva pasan a través de un canal de trabajo del endoscopio que presenta un diámetro muy reducido, por lo que deben estar diseñados con una gran longitud (más de 160 cm) y con un diámetro menor de 2,8 mm. En el extremo distal, presentan la parte que ejerce la acción sobre los tejidos humanos (extirpación de tejidos, cauterización, disección, recogida de cuerpos extraños o tejidos resecados, etc.). Mientras que el extremo proximal presenta un mecanismo para ejercer la acción o transmitir el movimiento a la parte distal. Por este motivo, su diseño requiere ciertas propiedades como una extensa longitud, diámetro limitado, flexibilidad y resistencia.



Figura 1.11: Ejemplo de un producto de la industria alimentaria con etiqueta medioambiental

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales utilizados comúnmente en la fabricación de accesorios endoscópicos pueden contener polímeros plásticos, metales, compuestos cerámicos, resinas compuestas y biomateriales. La utilización de unos u otros depende de la estructura, propiedades y rendimiento que vaya a representar el dispositivo. Los polímeros termoplásticos, polímeros termoestables y elastómeros se utilizan en muchas ocasiones como estructuras biocompatibles. Los metales se utilizan comúnmente debido a su resistencia, durabilidad y alta conductividad eléctrica y térmica. Los compuestos cerámicos como vidrio y otras estructuras cristalinas con propiedades piezoelectricas son materiales inorgánicos robustos, que ofrecen propiedades interesantes en ingeniería biosanitaria. Por último, los biomateriales son sustancias no vitales diseñados para interactuar con sistemas biológicos con el objetivo de reemplazar o restaurar funciones [78]. Además, es frecuente que los accesorios de endoscopia presenten embalajes individuales, que están constituidos por plástico, papel y cartón, y que suponen un aumento considerablemente del volumen de materiales utilizados.

Hace más de 30 años, Spaulding diseñó una clasificación de instrumentos para el cuidado de pacientes que consiste en agruparlos en función del riesgo de infección asociado a estos dispositivos. Esta clasificación los divide en críticos, semicríticos y no críticos [79]. Los instrumentos críticos deben adquirirse estériles o esterilizarlos de nuevo antes de un repetido uso sobre los pacientes. Los instrumentos quirúrgicos, los catéteres cardíacos y urinarios, los implantes y las sondas son considerados instrumentos críticos. Los accesorios de endoscopia son también considerados dispositivos críticos, ya que atraviesan membranas mucosas y pueden estar en contacto directamente en cavidades estériles o en el torrente sanguíneo [80].

En los inicios de la endoscopia digestiva, los accesorios de diagnóstico y tratamiento se diseñaron para ser reutilizables, siendo esterilizados de forma similar a los dispositivos y accesorios quirúrgicos. Sin embargo, en los últimos 20 años se ha estandarizado el uso de accesorios de endoscopia desechables. El aumento del volumen de procedimientos, la facilidad de uso, la ausencia de necesidad de reprocesamiento y la teórica imposibilidad de contaminación infecciosa han llevado a que en la actualidad es anecdótico contar con instrumentos reutilizables en las unidades de endoscopia digestiva (Figura 1.12)

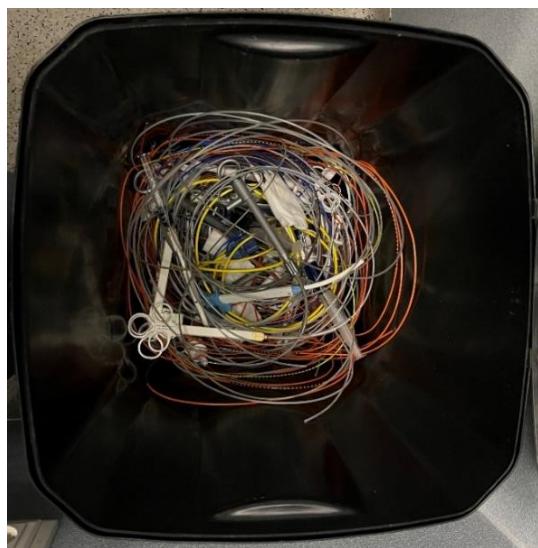


Figura 1.12: Contenedor de residuos biomédicos de endoscopia digestiva, con gran número de accesorios de un solo uso como pinzas de biopsia, asas de polipectomía, agujas de inyección y hemoclips.

En esta transición, no se han realizado estudios sobre la implicación medioambiental de la adopción global de accesorios endoscópicos de un solo uso. Además, esta transición a dispositivos de un solo uso no está basada en una evidencia científica sólida. Los datos provenientes de los estudios de anestesiología indican que el uso generalizado de dispositivos médicos de un solo uso en el área quirúrgica no reduce significativamente el riesgo de infección para los pacientes, pero tiene un impacto financiero, ambiental y social mayor que el uso de dispositivos reutilizables [81]. Esto ocurre tanto por el hecho de la necesidad de una producción continua de nuevos accesorios como por el transporte de los mismos desde los lugares de producción y también por su posterior gestión de residuos.

El verdadero riesgo de transmisión de infecciones debido a accesorios reutilizables sigue siendo controvertido. La sociedad americana de endoscopia digestiva (ASGE) en 2010 sostuvo que los esfinterotomos utilizados para CPRE, cuando son reutilizables y reprocesados adecuadamente, ofrecen ahorros potenciales sin presentar riesgos de infección [82]. Varios estudios respaldan la idea de que los dispositivos reutilizables son seguros cuando se reprocesan adecuadamente [83-85], mientras que otros sí puntualizan que el riesgo de infección no es nulo [86, 87]. Además, nunca se han descrito brotes infecciosos debidos a la reutilización de accesorios en endoscopia [48]. En contra de los accesorios desechables, también podemos afirmar que, en el ámbito de la cirugía, el

1. INTRODUCCIÓN

reprocesamiento de instrumentos quirúrgicos ha demostrado una reducción del 10 % de las emisiones de GEI [40].

Sin embargo, el cálculo del impacto medioambiental requiere más información que la disyuntiva entre material reutilizable y desecharable. En este sentido, conocer la composición exacta del material fungible que se utiliza en las unidades de endoscopia, cuya información no es aportada por los fabricantes en muchas ocasiones, es un parámetro bastante importante. Desafortunadamente, la legislación actual de la Unión Europea sobre dispositivos médicos no obliga a las empresas a detallar públicamente la composición y las fuentes de los materiales utilizados, y esta información rara vez se proporciona a los usuarios [88]. Los accesorios en endoscopia digestiva, tanto aquellos en contacto con el paciente a través del canal de trabajo (pinzas de biopsia, asas de polipectomía, hemoclips) como otros accesorios necesarios para el funcionamiento de la torre de endoscopia y el proceso diagnóstico (catéteres de irrigación e insuflación, botellas de agua), suelen estar compuestos predominantemente por polímeros plásticos. Algunos de ellos incluyen materiales como el cloruro de polivinilo (PVC) y ftalatos, que tienen cierto potencial carcinogénico y pueden suponer riesgos para la salud [89]. Además, en muchas ocasiones los accesorios de un solo uso presentan un embalaje excesivo. Algunas empresas introducen extensos manuales de uso, precauciones y documentos de garantía impresos a papel, que en ocasiones representan alrededor del 30 % del peso total, por lo que no son justificables. Un código QR que acceda a estas instrucciones mediante conexión a internet puede ser preferible.

La Sociedad Europea de Endoscopia Digestiva (ESGE) aboga por fomentar el uso de dispositivos y accesorios de endoscopia que tengan un diseño sostenible. Este es el caso de hemoclips de un solo uso, donde sus mangos y dispositivos de liberación son recargables, lo que permite colocar un número ilimitado de clips, evitando alrededor de 80 g de residuos por clip. Esta estrategia es ideal para intervenciones donde se usen gran cantidad de clips, como el cierre de escaras de polipectomía, el cierre de mucosotomías tras miotomía endoscópica o el tratamiento de las perforaciones [48].

Al haber aumentado considerablemente el volumen de material fungible utilizado en endoscopias digestivas, y considerarse como RBM todos los accesorios que pasan a través del canal de trabajo del endoscopio, debemos conocer su composición para determinar cuál es el impacto medioambiental de la extracción de materias primas y métodos de producción

durante su fabricación, así como cuál es el efecto que produce su gestión de residuos mediante incineración.

El empleo de unos materiales u otros en la fabricación accesorios fungibles es importante desde el punto de vista medioambiental. Unos presentan un potencial de calentamiento global (GWP, del inglés *global warming potential*) superior a otros. Este potencial está determinado por la capacidad de cada material de atrapar calor en la atmósfera. Cuando plásticos como el polietileno (PE) se incineran o degradan, liberan GEI como el CO₂ y el metano, sustancias con gran capacidad de absorción en el espectro infrarrojo, lo que contribuye a un mayor GWP. Los metales, en cambio, no liberan esos gases durante su uso ni durante los procesos de fin de vida útil. Aunque su producción puede consumir mucha energía, estas emisiones suelen verse compensadas por los beneficios de la posibilidad de reciclado del metal, por lo que los metales tienden a tener un GWP global más bajo en comparación con determinados plásticos [90].

1.7. Infecciones asociadas a duodenoscopios e impacto medioambiental que representan los duodenoscopios de un solo uso.

Los duodenoscopios son endoscopios diseñados específicamente para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades de la vía biliar y el páncreas, mediante la CPRE. Se utilizan en el tracto digestivo superior, y a diferencia del resto de endoscopios convencionales, presentan una cámara de visión lateral para enfrentar adecuadamente la papila mayor en la segunda porción duodenal. Poseen un canal de trabajo de mayor diámetro que un gastroscopio convencional y un elevador que permite realizar movimientos verticales de los accesorios y así permitir la canulación de la papila mayor. Por su morfología y materiales, este sistema elevador y la parte distal del duodenoscopio presentan mayores dificultades para conseguir una correcta desinfección y reprocesamiento, y se han descrito casos de contaminación cruzada de patógenos entre pacientes por duodenoscopios no desinfectados por completo, conllevando brotes infecciosos de origen yatrogénico [91].

El riesgo real de infecciones asociadas directamente con el uso de endoscopios se estima que es de 1 infección por cada 20.000-1,8 millones de procedimientos [92]. En el período entre 2008 y 2018, se informó de 490 casos de contaminación de duodenoscopios reutilizables (DR) en todo el mundo, lo que conllevó 32 fallecimientos. Esto se traduce en

1. INTRODUCCIÓN

un riesgo general de muerte de aproximadamente 1 en 150.000 CPRE [93]. Esta tasa es considerablemente más baja que la mortalidad por todas las causas después de una CPRE, que es de 1 entre 500 [94]. En una revisión sistemática posterior, el riesgo mínimo estimado de infección asociada a duodenoscopios fue del 0,01 %, y la colonización mínima estimada asociada a duodenoscopios fue del 0,023 % al 0,029 % [95]. Sin embargo, existe un riesgo potencial de infección inherente a todas las endoscopias. La contaminación del endoscopio no se traduce necesariamente en infección clínicamente relevante, ya que se han detectado tasas de colonización de microorganismos de hasta el 71 % en endoscopios listos para usar en pacientes [96]. El riesgo de una infección clínicamente relevante probablemente sea muy bajo, ya que se requieren múltiples pasos. Para que se produzca una infección, es necesario que exista una carga infecciosa lo suficientemente alta para que conduzca a una bacteriemia que no pueda contener el sistema inmune [48].

En los últimos años, la preocupación por los brotes infecciosos vinculados a duodenoscopios contaminados [97, 98], unido a la conveniencia de evitar el reprocesamiento de los endoscopios, ha motivado el desarrollo de duodenoscopios desechables de un solo uso (DD). Estos modelos novedosos de duodenoscopios están concebidos para evitar el riesgo de contaminación cruzada de patógenos infecciosos [99].

Sin embargo, la mayoría de los brotes infecciosos se atribuyeron al incumplimiento de los protocolos de limpieza y desinfección. Tras la exigencia de la implementación de técnicas mejoradas de limpieza y reprocesamiento de endoscopios por parte de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA, del inglés *Food and Drug Administration*), existió una notable disminución de las infecciones reportadas, disminuyendo de un pico de 250 casos en 2015, a 36 casos en 2018 [100]. Este hecho subraya la necesidad urgente de mejorar el diseño y la tecnología de los duodenoscopios para mitigar estos riesgos [101].

Durante la CPRE, se ha confirmado retrospectivamente la transmisión de Enterobacteriaceae a través de duodenoscopios contaminados, en particular durante la colocación de endoprótesis biliares, en pacientes hospitalizados y con intervenciones sobre colangiocarcinoma [99]. Sin embargo, la FDA realizó en 2022 un comunicado de seguridad donde indican que los nuevos diseños de duodenoscopios con capuchones y tapones desechables, como Fujifilm ED-580XT (FUJIFILM Corporation, Japón) (Figura 1.13) tienen una tasa del 0 % de fallos en el reprocesamiento, y sólo el 1,1 % de los cultivos

fueron positivos para organismos con riesgo infeccioso. Esta tasa ha mejorado notablemente respecto del 4 al 6 % de contaminación cruzada por microorganismos de alto riesgo observada en duodenoscopios similares de modelos más antiguos [102]. La FDA recomienda la transición a diseños de duodenoscopios que faciliten la limpieza y desinfección, como los DR con capuchones distales y tapones desechables [102].

Aunque el riesgo de infección no puede eliminarse por completo con un reprocesamiento adecuado, sí puede reducirse sustancialmente. Existen medidas que tienen el potencial de reducir estas tasas, como las auditorias periódicas, los programas de educación y capacitación estandarizados que incluyan una evaluación de competencias de la desinfección, así como la investigación de métodos más efectivos de reprocesamiento de endoscopios. Reforzar la importancia de la higiene de manos y otras medidas básicas de higiene también son cruciales para evitar el riesgo de infección [103].



Figura 1.13: Parte distal con capuchón desechable de un duodenoscopio reutilizable de la empresa Fujifilm. Tecnología utilizada para facilitar el reprocesamiento y disminuir el riesgo de infección.

Los DD presentan ventajas significativas, como la ausencia de riesgo teórico de infección y la supresión del coste del reprocesamiento (Figura 1.14). Desde el punto de vista económico, los DD pueden resultar ventajosos en centros de bajo volumen de CPRE que no estén dispuestos a invertir en equipos de desinfección y reprocesamiento. Además, los DD se han propuesto para procedimientos de emergencia fuera de la unidad de endoscopia, como en unidades de cuidados intensivos o quirófanos, debido a que existe una mayor probabilidad de que se realice una desinfección y reprocesamiento inadecuados, al no estar presente el personal auxiliar experto fuera de horarios habituales. También existe un mayor riesgo de colonización por patógenos multirresistentes en este tipo de

1. INTRODUCCIÓN

pacientes críticos, que podrían adherirse potencialmente al duodenoscopio. En estos casos, resulta una ventaja importante no tener que reprocesar el endoscopio después de una exploración fuera de la unidad [104].

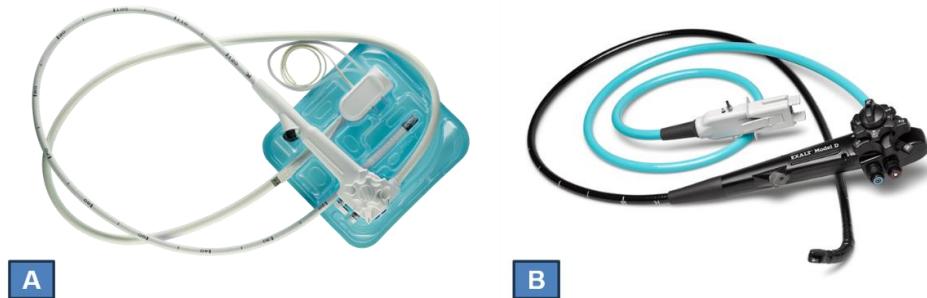


Figura 1.14: Duodenoscopios desechables disponibles en el mercado: A) Duodenoscope model aScope (Ambu Innovation GmbH), B) EXALT Model D Single-Use Duodenoscope (Boston Scientific Corporation)

Sin embargo, no se han analizado los efectos nocivos para la salud derivados del impacto medioambiental del uso sistemático de DD en todos los procedimientos de CPRE. Estudios de sostenibilidad recientes indican que el impacto medioambiental de la actividad sanitaria representa un 4.4 %–5.4 % de la huella de carbono total y que las unidades de endoscopia gastrointestinal son el tercer mayor productor de residuos [6, 7, 45]. Se ha propuesto que, en promedio, cada procedimiento de endoscopia con endoscopios reutilizables, genera hasta 2,1 kg de residuos generales [33] y emite aproximadamente 28,4 kg CO₂-eq [44]. Si todos los procedimientos endoscópicos se realizaran con endoscopios de un solo uso, los residuos derivados de la desinfección y reprocesamiento disminuirían notablemente. Sin embargo, el total de residuos aumentaría un 40 %, sobre todo los RBM. Esto ocurre porque los residuos derivados de la disposición final de los endoscopios cuadriplica la derivada del reprocesamiento [33]. Estos residuos deben incinerarse, y aunque la incineración del plástico se ha propuesto en ocasiones como energía renovable, mediante sistemas de aprovechamiento energético como EfW, genera más GEI que las plantas de carbón y produce subproductos tóxicos y micropartículas, asociadas con enfermedades respiratorias [105]. Por lo tanto, la incineración de residuos médicos no puede considerarse una práctica sostenible.

La adopción global de endoscopios de un solo uso eliminaría teóricamente el riesgo de transmisión de infecciones entre pacientes [106], pero implica un importante impacto

ecológico y económico. Desde el punto de vista medioambiental, este impacto es notable tanto por la formación de residuos, como por la extracción de materias primas y fabricación de estos endoscopios (un DR puede tener una vida útil de más de 2000 procedimientos). Desde el punto de vista económico, el coste de un DD oscila entre 1700 y 3600 euros [107], y teniendo en cuenta todas las CPRE realizadas, la carga total adicional de costes sería de miles de millones de euros. Esto podría llevar a decisiones difíciles relacionadas con la reasignación de recursos, ya de por sí limitados, reducción de ciertos servicios médicos, o una mayor carga financiera para los pacientes.

Este escenario representa un desafío para la gestión en endoscopia digestiva. Por una parte, se trata de encontrar el equilibrio entre el riesgo de infección por contaminación cruzada y muerte, eventos generalmente raros, y las consecuencias no deseadas que consiguieran evitar este riesgo. En efecto, el uso de DD implica un alto consumo de recursos e impactos medioambientales [33]. Es importante resaltar que el procesamiento de los DR también tiene un impacto no desdeñable. Este proceso requiere energía, un volumen elevado de agua y detergentes, y genera residuos potencialmente tóxicos. Además, requiere de espacios adaptados para la limpieza, con áreas de desinfección de trabajo manual, instalaciones de extracción de vapores químicos, equipamiento de limpieza manual como cepillos y sistemas de aire comprimido para el secado [80]. A esto se suman los gastos en climatización y energía, compra y reparación de sistemas de desinfección de endoscopios, así como contratación de personal que lo maneje [33]. Por ello es importante diseñar estudios donde se evalúe el impacto ecológico de los DD respecto de los DR.

En un estudio reciente sobre el impacto medioambiental de los duodenoscopios, se estima que los DD podrían ser de 24 a 47 veces más contaminantes que los DR (36,3 kgCO₂-eq respecto a 1,53 kgCO₂-eq) [108]. Los DD han irrumpido recientemente en el mercado, sin embargo, la composición estructural de estos endoscopios no viene aportada por los fabricantes, y aún no se ha analizado, por lo que las diferencias exactas en la huella de carbono entre DD y DR no se han determinado con fiabilidad. Los principales componentes de los endoscopios reutilizables para endoscopia digestiva se estima que son metales (aproximadamente el 70 %) y plásticos (25 %–30 %), con una pequeña proporción restante de componentes electrónicos. En cambio, los endoscopios de un solo uso están compuestos principalmente de plástico y una proporción menor de metal [48].

De acuerdo con la legislación europea, estos endoscopios de un solo uso se

1. INTRODUCCIÓN

clasifican como RBM, lo que obliga a su incineración a alta temperatura por estar en contacto con tejidos humanos. En principio, este proceso amplifica significativamente las emisiones perjudiciales en comparación con el impacto derivado del reprocesamiento de un endoscopio. Por lo tanto, el análisis de la composición del material es un paso crucial en la evaluación de las emisiones de carbono, ya que es necesario comprender el impacto ambiental de la extracción de materias primas y la fabricación en plantas industriales.

El riesgo de infección clínicamente relevante relacionado con el endoscopio después de un reprocesamiento adecuado es probablemente mínimo, aunque no nulo. Es necesario tomar medidas para que los costes económicos, ambientales y sociales en el intento de reducir el riesgo a cero no superen los beneficios obtenidos. Son necesarios estudios basados en evaluaciones del ciclo de vida de los endoscopios de un solo uso y estudios comparativos sobre infecciones clínicamente relevantes para poder realizar recomendaciones a favor del uso de estos endoscopios, por lo que la ESGE de momento no recomienda su uso rutinario [48].

1.8. Análisis de la composición de materiales

Los materiales más utilizados en la fabricación de accesorios endoscópicos suelen ser polímeros plásticos y metálicos.

El término “plástico” deriva de la palabra griega “plastikos”, que hace referencia a un material cuya principal característica es ser moldeable y maleable. Aunque el uso del caucho, un polímero natural, se remonta al 1600 a.C., la síntesis de los polímeros sintéticos no comenzó hasta finales del siglo XIX [109]. En la Figura 1.15 se muestra en una línea de tiempo los momentos más importantes en la evolución de los plásticos modernos, el desarrollo de las técnicas empleadas para su detección y el seguimiento de la contaminación por plásticos. En la Tabla 1.1, se muestran los polímeros plásticos más empleados.

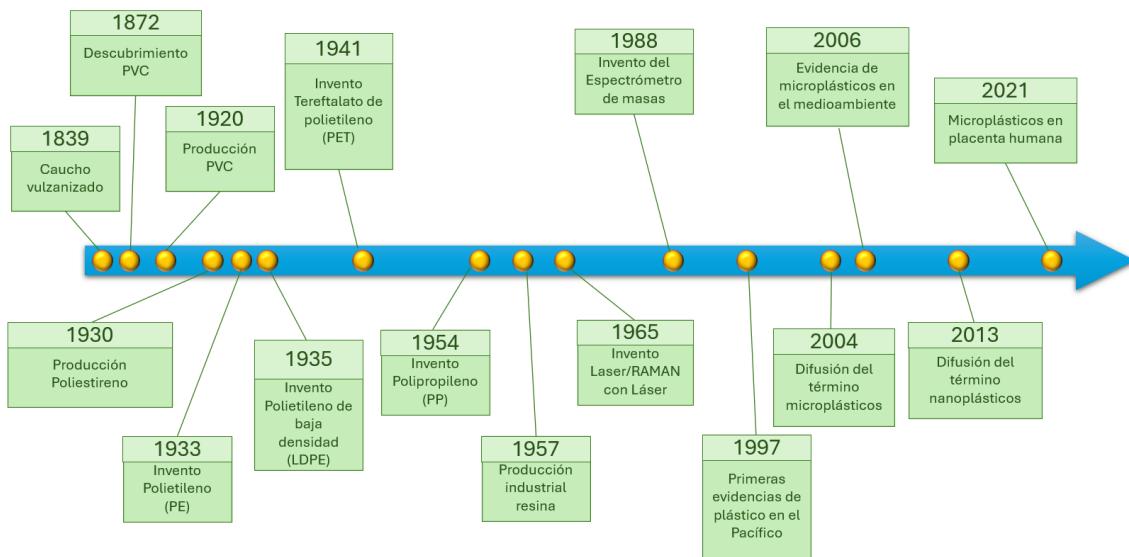


Figura 1.15: Línea de tiempo que muestra eventos importantes en la producción y detección de plásticos. Adaptado de [109]

Tabla 1.1. Listado de los plásticos más estudiados con su densidad y estimación de consumo global. Adaptado de [109]

Tipo de polímero	Abreviatura	Densidad, kg m ⁻³	Consumo mundial, %
Polipropileno	PP	900	19
Polietileno de baja densidad	LDPE	910	18
Polietileno de alta densidad	HDPE	970	12
Cloruro de polivinilo	PVC	1350	10
Tereftalato de polietileno	PET	1380	7
Poliestireno	PS	45	7
Policarbonato	PC	1200	5

En cuanto a las técnicas empleadas para la identificación y cuantificación de polímeros, son muchas y muy diversas, siendo a menudo necesaria la utilización de más de una de ellas para caracterizar de forma inequívoca el polímero.

Métodos térmicos. Los métodos térmicos son fundamentales en la caracterización de plásticos y polímeros, proporcionando información valiosa sobre sus propiedades térmicas, transiciones de fase, estabilidad y comportamiento mecánico a diferentes temperaturas. Entre los más utilizados están la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y el Análisis

1. INTRODUCCIÓN

Termogravimétrico (TGA).

La DSC mide las diferencias de flujo de calor que hay que aplicar a una muestra y un material de referencia mientras se incrementa la temperatura. Se utiliza para estudiar las transiciones de fase que pueden tener lugar en los polímeros como la transición vítreo, fusión y cristalización. Las temperaturas a las que tienen lugar estas transiciones son una característica de cada tipo de plástico por lo que es una técnica ampliamente utilizada en la identificación de plásticos. Es el método de análisis térmico más usado, sobre todo por su rapidez, sencillez y disponibilidad.

El TGA es una técnica que registra de forma continua la masa de una muestra mientras se la somete a un calentamiento controlado hasta que se logra la descomposición total del plástico. El equipo proporciona un registro del cambio de la masa o del porcentaje de la masa en función de la temperatura, que recibe el nombre de termograma. En los estudios de polímeros, los termogramas proporcionan información sobre los mecanismos de descomposición de diversas preparaciones poliméricas. Además, los patrones de descomposición son característicos para cada tipo de polímero y pueden ser utilizados con fines de identificación [110].

Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Es una técnica analítica que utiliza la radiación infrarroja para estudiar las vibraciones moleculares de los grupos funcionales de las moléculas. Los espectrómetros de infrarrojos obtienen información química mediante la detección de los modos de vibración de las moléculas de la muestra a diferentes frecuencias en el rango del infrarrojo. Los datos recogidos por el detector son procesados mediante la Transformada de Fourier que los convierte en un espectro convencional frente a la longitud de onda. En un espectro FTIR cada pico del espectro representa una vibración molecular específica, lo que permite identificar compuestos y analizar su estructura.

De los diferentes modos de análisis de muestras de la FTIR, el modo ATR-FTIR es el más adecuado para el análisis de plásticos [111].

Para determinar la composición de materiales metálicos es más adecuado utilizar la Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) que proporciona imágenes de una resolución espacial excepcionalmente alta y la observación detallada de la topografía superficial y la morfología de diversos materiales, incluyendo estructuras nanométricas. Además, estos microscopios pueden tener acoplados dentro de la lente

detectores de energía dispersiva de Rayos X (EDX). El acoplamiento FESEM / EDX correlaciona la información topográfica obtenida a partir de imágenes FESEM con la información de composición elemental obtenida a partir de EDX, lo que lo hace especialmente útil en campos como la nanotecnología, la ciencia de los materiales, la geología y la ciencia forense, donde es crucial comprender la estructura y la composición de los materiales [112].

El análisis de la composición de los materiales es crucial para calcular la huella de carbono ya que implica evaluar los tipos y cantidades de materiales utilizados, así como sus fuentes y métodos de producción. Diferentes materiales tienen diferentes perfiles ambientales, y algunos procesos de fabricación y de extracción de materias primas pueden generar mayores emisiones de GEI que otros. Al comprender la composición detallada de los materiales a lo largo del ciclo de vida, se puede identificar dónde se producen las mayores emisiones y se pueden buscar oportunidades para reducir la huella de carbono a través de cambios en el diseño, procesos de fabricación más eficientes o la selección de materiales más sostenibles [113].

1.9. Análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de la huella de carbono en endoscopia digestiva

El cambio climático es causado por la emisión de GEI. Uno de los gases más relevantes es el CO₂, emitido a la atmósfera por actividades como el uso de combustibles fósiles y la deforestación. El aumento de concentración CO₂ en la atmósfera sigue provocando un aumento de la temperatura global. Además del CO₂, hay otros gases de efecto invernadero que son emitidos a la atmósfera y contribuyen al cambio climático. Estos incluyen metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), CFCs y hexafluoruro de azufre (SF₆). El CH₄ es liberado a la atmósfera a través de actividades humanas, como la agricultura, la ganadería y la extracción de petróleo y gas. También se produce naturalmente a través de procesos como la descomposición de residuos orgánicos en vertederos y la fermentación en el sistema digestivo de los animales. El óxido nitroso se libera a través de actividades agrícolas, como la fertilización y la rotación de cultivos, así como de la producción de fertilizantes y la quema de biomasa. Los CFCs son gases industriales utilizados en refrigeración y aire acondicionado, así como en la fabricación de productos químicos. El

I. INTRODUCCIÓN

SF₆ se utiliza en aplicaciones eléctricas, como interruptores y transformadores de alta tensión [114].

La huella de carbono se mide en kilogramos de equivalente de dióxido de carbono (kgCO₂-eq), lo que significa que tiene en cuenta no solo las emisiones de CO₂, sino también las emisiones de otros GEI. El cálculo de la huella de carbono es un proceso complejo que implica la identificación y medición de las emisiones de GEI asociadas con un producto, servicio o actividad específicos. Una vez identificadas las emisiones, se asignan valores de potencial de calentamiento global a cada gas, que representan su capacidad para afectar a la temperatura global. Estos valores se utilizan para convertir las emisiones de cada gas a una unidad común, que es el equivalente de CO₂. La suma total de estas unidades proporciona la huella de carbono total en kgCO₂-eq. Es importante tener en cuenta que la huella de carbono no solo incluye las emisiones directas de un producto o actividad, sino también las emisiones indirectas asociadas con la producción de materias primas, la fabricación, el transporte y el uso del producto [115].

El cálculo del impacto medioambiental o huella de carbono se realiza mediante el ACV. Se trata de un método que permite evaluar el impacto ambiental de un producto, sistema o proceso desde su creación hasta su desecho. Este análisis incluye la extracción de materias primas, producción, transporte, uso, y disposición final [116]. Se logra mediante la evaluación de factores como la emisión de GEI, la utilización de energía y recursos naturales, y la generación de residuos. Es una herramienta valiosa para la toma de decisiones y la planificación estratégica, ya que permite identificar las fases del ciclo más contaminantes e implementar medidas sobre las mismas. En el mundo empresarial e industrial, se están estableciendo medidas de sostenibilidad por su papel crucial en la conformidad normativa, desarrollo de productos, gestión de la cadena de suministro, y estrategias de marketing y ventas. Cada vez son más estrictas las normativas y licitaciones públicas que exigen revelar datos ambientales de los productos, impulsando así la necesidad de estudios de ACV. Cada vez más empresas se sienten interesadas, ya que en muchas ocasiones, el uso de proveedores más sostenibles en función de la cadena de suministro, suele traducirse en reducción de costes y eficiencia energética, así como desde el punto de vista del marketing, ya que hasta el 81 % de los consumidores valoran positivamente la sostenibilidad [117]. Existen diferentes modelos de ciclo de vida de un producto.

- **Modelo cradle-to-grave (“de la cuna a la tumba”)**: Incluye todas las fases, donde la cuna simboliza la extracción de materias primas y la tumba la disposición final de los residuos, teniendo en cuenta que el transporte puede ocurrir en cualquier momento de las diferentes fases.
- **Modelo cradle-to-gate (“de la cuna a la fábrica”)**: Se utiliza para certificaciones de declaración ambiental de productos, ya que evalúa el ciclo de vida solo hasta que sale de las puertas de su fábrica, antes del transporte al consumidor, omitiendo fases de uso y eliminación.
- **Modelo cradle-to-cradle (“de la cuna a la cuna”)**: Promueve el reciclaje y la reutilización, reemplazando la etapa de desecho con un proceso de reciclaje que permite la reutilización del producto, en un concepto ligado a la economía circular (Figura 1.16).

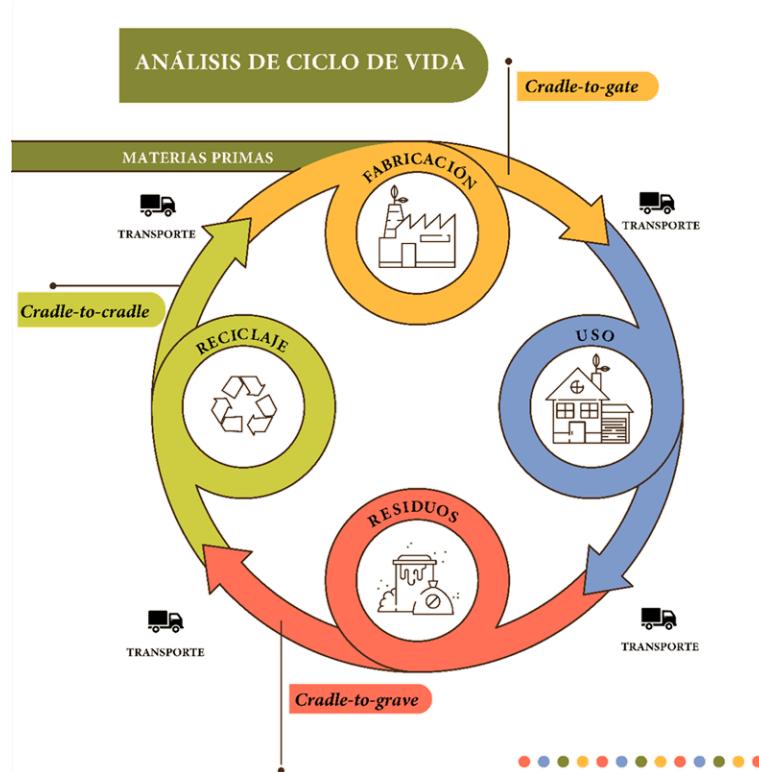


Figura 1.16: Etapas y modelos de un análisis de ciclo de vida (infografía adaptada de freepik.com)

El ACV abarca el desarrollo de un inventario de *inputs* (“insumos”) de energía y materias primas relevantes, así como la evaluación de los residuos e impactos ambientales relacionados (*outputs*) y la interpretación de los resultados para apoyar decisiones

1. INTRODUCCIÓN

informadas [118]. Este proceso de ACV sigue una aproximación sistemática y por fases (Figura 1.17):

- **Definición del objetivo:** Describe el producto, proceso o actividad que se va a analizar, estableciendo el contexto de la evaluación e identificando los límites y efectos ambientales.
- **Análisis de inventario:** Identifica y cuantifica el uso de energía, agua y materiales, así como las emisiones ambientales (emisiones de GEI, disposición de residuos sólidos, descargas de aguas residuales).
- **Evaluación de impacto:** Evalúa los posibles efectos humanos y ecológicos de las estimaciones identificadas en el análisis de inventario.
- **Interpretación:** Analiza los resultados del análisis de inventario y evaluación de impacto, considerando la incertidumbre y las suposiciones utilizadas en la generación de resultados [118].

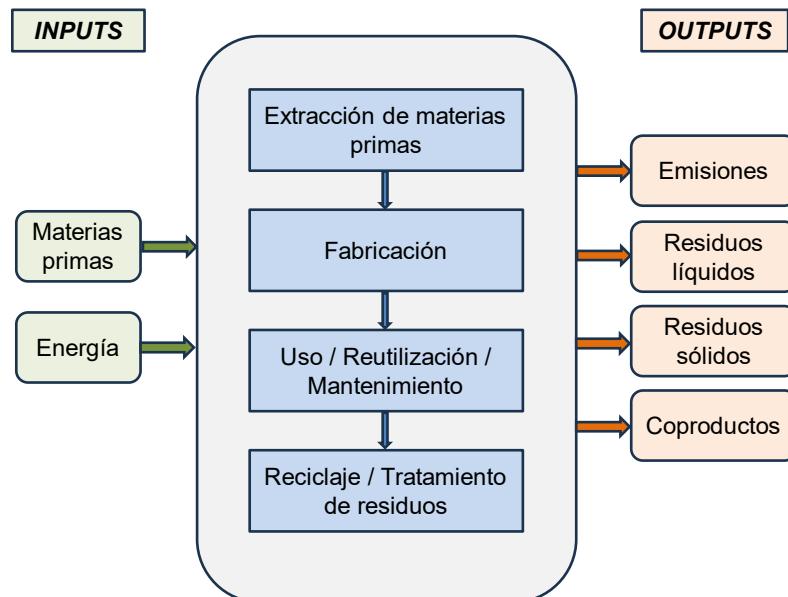


Figura 1.17: Fases de un análisis de ciclo de vida teniendo en cuenta los insumos o entradas (inputs) y los resultados o salidas (outputs).

En cada estudio de ACV, es crucial determinar el nivel de especificidad necesario, ya sea genérico o específico del producto. Los datos específicos pueden ser más útiles internamente para una empresa, mientras que datos genéricos pueden ser preferibles en

ciertas circunstancias de generalización y reproducción de resultados [118].

Un análisis de inventario en el ACV cuantifica los requisitos de energía y materias primas, emisiones atmosféricas, desechos líquidos, residuos sólidos y otras fuentes de contaminación a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad. Los análisis de inventario se utilizan para comparar productos, considerar factores ambientales en la selección de materiales y respaldar la formulación de políticas gubernamentales. El diagrama de flujo de un análisis de inventario es crucial, ya que representa las entradas y salidas del sistema, y su complejidad afecta la precisión de los resultados. Los datos se recopilan para cada subsistema, describiendo *inputs*, procesos y *outputs*, e identificando y cuantificando los coproductos. Los coproductos son los productos secundarios o adicionales que se generan durante un proceso industrial y que tienen valor económico o utilidad. Un ejemplo podría ser la producción de aceite de palma, donde el aceite de palma es el producto principal, pero durante el proceso también se generan subproductos como cáscaras de palma y tortas de prensa. Estos subproductos pueden tener aplicaciones valiosas, como combustibles, fertilizantes o alimentos para animales. El transporte entre procesos también se incluye en el subsistema, cuantificándose en términos de distancia, peso y modo de transporte [118]. Para realizar un estudio de ACV, nos valemos de programas informáticos o *software* diseñados para tal fin, como *openLCA* (GreenDelta GmbH, Germany) o *SimaPro* (PRé Sustainability, Netherlands). Ambas herramientas permiten definir el sistema bajo análisis, ingresar datos de inventario, y realizar cálculos matemáticos para determinar los flujos de materiales y energía. Ofrecen capacidades de análisis de sensibilidad, integración con bases de datos, y generan informes detallados y visualizaciones. Además, permiten la aplicación de diversas metodologías de evaluación ambiental. Estos cálculos se realizan a través de datos previamente analizados que están presentes en grandes bases de datos de análisis de inventario como *ecoinvent* o *environmental footprint secondary data* [119]. Estas bases de datos contienen información sobre inventarios de ciclo de vida (flujos de entrada y salida de materiales y energía), datos de impacto ambiental y otros datos necesarios para realizar evaluaciones ambientales integrales [120].

Una vez definido el objetivo, valorado los materiales que se desean estudiar, y realizado un análisis de inventario, es necesario evaluar el impacto del ACV e interpretar los resultados. Esto es, evaluar posibles efectos del consumo de recursos ambientales y la

I. INTRODUCCIÓN

liberación de emisiones identificadas durante el análisis de inventario. La evaluación de este impacto debe abordar los efectos ecológicos y de salud humana. Esta evaluación intenta establecer una conexión entre el producto o proceso y sus posibles impactos ambientales. Se genera una estimación del impacto sobre el cambio climático (huella de carbono), transformando todo tipo de gases de GEI a una unidad equivalente de emisiones de CO₂ (kgCO₂-eq), pero también se expresan otros indicadores ambientales o categorías de impacto, como pueden ser: la radiación ionizante, la acidificación, eutrofización, depleción del ozono, ecotoxicidad de agua dulce, carcinogenicidad y toxicidad humana y consumo de agua y minerales, cuyas unidades y características se resumen en la Tabla 1.2.

En resumen, el análisis de ciclo de vida (ACV) examina el impacto ambiental de productos, procesos o actividades desde su creación hasta su disposición final. Se utilizan software especializados para realizar cálculos matemáticos y evaluaciones ambientales integrales. La huella de carbono, medida en kgCO₂-eq, es un indicador común que considera diversas emisiones de GEI. Pero también, se evalúan otros indicadores medioambientales, que hemos descrito previamente, y que proporcionan una comprensión holística del impacto ambiental de un producto o actividad, permitiendo la toma de decisiones informada y el fomento de prácticas sostenibles.

Los estudios en sostenibilidad en sanidad y especialmente en endoscopia digestiva son totalmente necesarios para determinar cuáles son las fuentes principales de emisiones de GEI e idear formas de reducir nuestro impacto medioambiental. El uso elevado de material fungible representa un importante factor ecológico, y no conocemos su verdadera composición estructural, que es primordial para realizar el ACV. Debemos conocer los materiales que utilizamos en endoscopia digestiva, y de ese modo reconocer, por un lado, aquellos materiales que puedan ser incorporados posteriormente a la cadena de reciclaje y, por otro, aquellos cuyo ciclo de vida resulte en menos emisiones al medio ambiente, para escoger opciones sostenibles y mitigar el impacto medioambiental.

Tabla 1.2: Otros indicadores medioambientales utilizados en estudios de sostenibilidad e impacto ecológico

Indicador ambiental	Definición y características	Unidad
Acidificación	Producción de sustancias como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno con efectos perjudiciales en ecosistemas, incluyendo la degradación del suelo, la acidificación del agua y el daño a la vida acuática. [121].	Equivalentes de moles de iones hidrógeno (mol H ⁺ eq)
Ecotoxicidad aguas dulces	Efectos tóxicos potenciales de las sustancias químicas liberadas en la calidad del agua dulce y los organismos acuáticos [122].	Unidad de toxicidad y carcinogenicidad para ecosistemas (CTUe)
Eutrofización	Enriquecimiento excesivo de nutrientes, como nitrógeno y fósforo que puede resultar en un crecimiento desmesurado de algas y otras plantas acuáticas, causando hipoxia en el medio acuático [123].	Kilogramos de fósforo equivalentes (kg P eq)
Toxicidad y carcinogenicidad	Potencial impacto de sustancias químicas específicas en la salud humana y la aparición de cáncer [124]	Unidad de toxicidad comparativa para humanos (CTUh)
Radiación ionizante	Emisión de radioisótopos que tienen la capacidad de ionizar átomos y moléculas, y al desintegrarse liberan radiación. La generación de energía nuclear o convencional, y algunos dispositivos médicos liberan radiación, cuya exposición altera el ADN provocando cáncer y malformaciones congénitas [125]	Kilogramos de uranio 235 equivalentes (kg U-235 eq)
Depleción de ozono	Agotamiento de la capa de ozono estratosférico debido a la emisión de sustancias químicas que contienen cloro y bromo, como los CFC, los halones y otros compuestos halogenados [126]	Kilogramos de equivalente de clorofluorocarbono-11 (kg CFC-11 eq)
Recursos metales y minerales	Cantidad de recursos minerales y metales utilizados y derivados de actividades de minería y procesamiento, que son parte vital de la mayoría de ciclos materiales complejos [127].	Kilogramos de equivalente de antimonio (kg Sb eq)
Consumo de agua	Volumen de agua invertida en el ciclo de vida de un producto. El agua es vital para mantener ecosistemas y no puede ser reemplazada por ninguna otra sustancia. Su escasez afecta a la biodiversidad y la persistencia de determinadas especies [128].	Metros cúbicos (m ³)

2. HIPÓTESIS

2. HIPÓTESIS

Partimos de la evidencia del elevado uso de material fungible en las unidades de endoscopia digestiva, siendo el tercer productor de residuos en el medio hospitalario. La incineración a alta temperatura de instrumentos fungibles con residuos biológicos es la vía menos sostenible, aunque necesaria para garantizar la seguridad y evitar transmisión de infecciones. Nuestra hipótesis para desarrollar estrategias de sostenibilidad se basa en tres aspectos:

Al conocer la composición estructural de los accesorios fungibles y endoscopios de un solo uso, y de este modo su huella de carbono, podríamos seleccionar los que presenten el ciclo de vida más sostenible.

Al analizar las partes de los accesorios de endoscopia que entran en contacto con el paciente y deben ser tratadas mediante incineración, podríamos conocer qué partes restantes no presentan un riesgo biológico, y de este modo determinar el impacto medioambiental de desechar estas partes mediante métodos más sostenibles.

Al determinar la composición y el impacto medioambiental de los duodenoscopios reutilizables y su reprocesamiento por un lado, y el impacto de los duodenoscopios desechables por otro, podríamos determinar en qué escenarios de sostenibilidad son convenientes cada uno de ellos.

3. OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es determinar el impacto medioambiental del material fungible de diagnóstico y tratamiento en endoscopia digestiva para crear nuevas estrategias que optimicen la sostenibilidad.

Objetivos específicos

1. Análisis de la composición y evaluación ambiental de los accesorios endoscópicos fungibles.
2. Creación y evaluación de intervenciones de sostenibilidad que mitiguen el impacto medioambiental de los accesorios de endoscopia.
3. Análisis de la composición y evaluación ambiental de los duodenoscopios desechables y reutilizables
4. Evaluación medioambiental del uso universal de duodenoscopios desechables para determinar en qué escenarios es sostenible

4. METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

4.1. Evaluación ambiental de accesorios de endoscopia digestiva

Para implementar medidas que mejoren la sostenibilidad en endoscopia, es imprescindible realizar un ACV de los accesorios endoscópicos para así determinar las etapas del ciclo de vida que son más contaminantes y poder aplicar medidas sobre ellas. Si deseamos realizar un análisis medioambiental adecuado, es capital conocer la composición estructural de las unidades funcionales a estudio, para así determinar la extracción de materias primas, modelos de producción y gestión de residuos que se llevaran a cabo a lo largo de su ciclo de vida.

4.1.1. Análisis de la composición de accesorios fungibles de endoscopia digestiva

El análisis de la composición del material fungible comienza por la elección de las unidades funcionales (accesorios endoscópicos) que deseamos analizar, en este caso seleccionamos los más frecuentemente utilizados en las unidades de endoscopia (pinzas de biopsia, asas de polipectomía y clips hemostáticos). Una vez se seleccionaron los accesorios, se fragmentaron y catalogaron, y se pasó a analizar la naturaleza y composición del material. El análisis de la composición del material se realizó en el laboratorio del Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular (CBIT) de la Universidad Politécnica de Valencia. Gracias a este grupo de ingenieros realizamos la caracterización de las propiedades de los componentes mediante técnicas analíticas como la Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR), Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Termogravimétrico (TGA) para polímeros plásticos y de Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FESEM) con detector de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) para componentes metálicos.

4.1.1.1. Selección de las muestras de instrumental utilizadas en el estudio

Todos los accesorios en endoscopia digestiva son de una gran longitud, pero tienen un diámetro limitado para poder ser utilizados a través de los canales de trabajo de los endoscopios (2,8 mm y 3,7 mm en el caso del gastroscopio y colonoscopio, respectivamente). En la parte proximal suelen presentar lo que conocemos como “mango”, que permite realizar la acción necesaria (abrir o cerrar una pinza, bisturí o asa de

4. METODOLOGÍA

polipectomía, etc.) para activar de forma dinámica cualquier tipo de accesorio. La parte proximal se une a través de largos componentes, como cables extensos revestidos de material plástico (cuerpo), que viajan por el canal de trabajo del endoscopio hasta el extremo distal. Esta última zona constituye la parte que estará en contacto con los tejidos del paciente, y tendrá diferentes formas dependiendo de la acción que lleve a cabo (agujas, pinzas, asas, bisturíes, etc.).

Las **osas de polipectomía** son uno de los instrumentos más frecuentemente empleados en endoscopia. Se trata de un cable de acero inoxidable envuelto en una vaina de plástico, en cuyo extremo distal tiene un acabado de forma circunferencial, permitiendo capturar y cortar tejidos en el interior del tracto digestivo, ya sea mediante corte en frío o mediante electrocoagulación (Figura 4.1). Existen numerosos tipos de asas en el mercado, dependiendo del tamaño del extremo distal, la disposición del cable (trenzado o filamento) y su forma (hexagonal, ovalada, redonda, etc.). Toda esta variabilidad viene dada para aportar versatilidad en la extirpación de cualquier tipo de lesión benigna o tumoral en el tracto digestivo, utilizando orificios naturales (boca, ano) sin necesidad de un abordaje quirúrgico.



Figura 4.1: Asa de polipectomía de uso endoscópico con extremo distal serrado y con conexión a electrocoagulación para resección con fuente de diatermia

Las **pinzas de biopsia** tienen como objetivo la toma de muestras de los diferentes tejidos del tracto digestivo para su estudio histológico (Figura 4.2), pero también existen otros modelos diseñados para la retirada de cuerpos extraños. Para las de estudio histológico, existen diferentes formas de extremo distal (anguladas, elípticas, rectas), que

pueden presentar diferencias en el tamaño de la muestra obtenida [129]. Las de cuerpos extraños presentan diferentes tamaños y disposiciones, como las pinzas de dientes de ratón o de cocodrilo, para optimizar la retirada de diferentes objetos (prótesis metálicas migradas, sondas, cuerpos extraños).

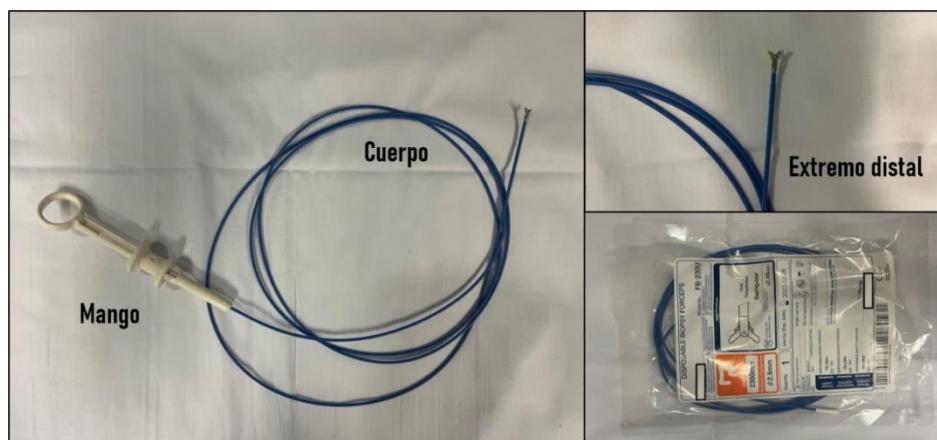


Figura 4.2: Pinza de biopsia de uso endoscópico con extremo distal de palas rectas para obtención de material histológico

Los **clips hemostáticos** son un tipo de grapa metálica de uso endoscópico que permiten aproximar tejidos y permanecen en una posición determinada durante semanas o meses (Figura 4.3). A través del mango se permite la apertura y cierre de las patas del clip y presentan un sistema de liberación que tras colocar el clip en el lugar adecuado permite retirar el cuerpo del dispositivo para que quede el clip ‘*in situ*’. Esta función consigue hacer hemostasia sobre úlceras sangrantes o cerrar soluciones de continuidad (cierre de resecciones mucosas o perforaciones).

Para realizar el análisis de la composición y hacer una comparación de la sostenibilidad de los materiales entre diferentes fabricantes, seleccionamos cuatro casas comerciales (A, B, C, D), y de cada una de ellas, tres pinzas de biopsia (A, B y C), tres asas de polipectomía (A, B y D) y dos hemoclips (A y B) (Figura 4.4).

4. METODOLOGÍA



Figura 4.3: Clip hemostático de uso endoscópico con extremo distal que presenta un sistema de liberación que se separa del cuerpo del dispositivo una vez accionado.



Figura 4.4: Accesorios endoscópicos fungibles de diferentes casas comerciales (A-D) seleccionados para estudio.

4.1.1.2. Tratamiento previo de las muestras

Una vez seleccionado el material, mediante herramientas como alicates, destornilladores y tijeras, realizamos una fragmentación ordenada de los dispositivos en

sus diferentes partes, catalogando y categorizando cada una de ellas por separado con una descripción, tipo de material aproximado (polímeros plásticos o metales) y peso (Figura 4.5). Se tuvo también en cuenta el peso del material (plástico y papel) utilizado para el empaquetado del instrumental.

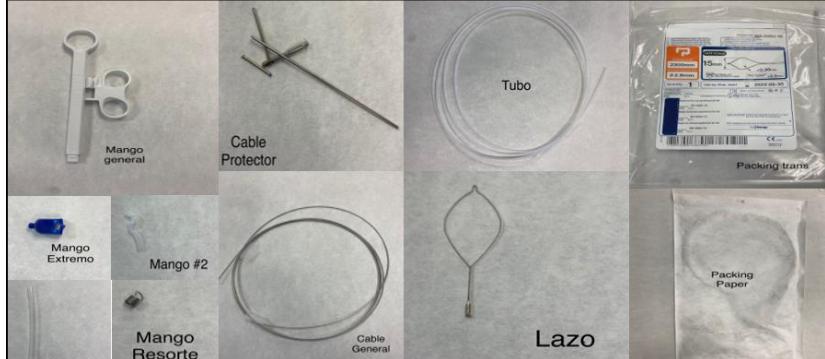
Asa de polipectomía B (gramos)		
Empaqueado plástico		8,36
Empaqueado papel		8,76
Mango	General (Blanco)	22,05
	Extremo (Azul)	1,04
	Protector #1	0,7474
	Protector #2	1,82
	Resorte	0,0526
Cable	General	8,75
	Protector	0,1613
	Lazo	0,0745
Tubo		12,77
		

Figura 4.5: Ejemplo de tabla de la categorización del asa de polipectomía B. Peso de las diferentes partes del instrumento una vez fragmentado.

A continuación, se prepararon las muestras para la caracterización, se seleccionó una muestra por cada parte y material diferente que componía cada uno de los ocho accesorios. Las muestras se clasificaron según su función y composición tras un primer estudio visual (Figura 4.6).

4.1.1.3. Análisis por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica muy adecuada y versátil en la identificación de plásticos ya que permite detectar con facilidad los tres tipos de transiciones térmicas que nos podemos encontrar en este tipo de materiales. En esta técnica, se mide el flujo de calor absorbido o liberado por la muestra en función de la temperatura o el tiempo mientras se somete a un programa de cambio de temperatura controlado. Este

4. METODOLOGÍA

análisis es útil para identificar los puntos o temperaturas de transición de fase, como temperaturas de fusión, cristalización y reacciones químicas. Detecta la presencia de impurezas y la estabilidad térmica de los materiales, y de ese modo permite estimar el tipo de material adecuado [110].

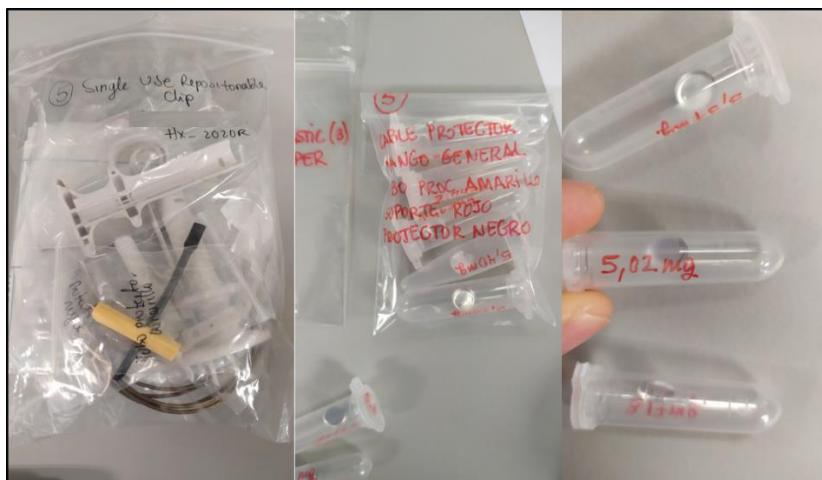


Figura 4.6: Clip (A) una vez fragmentado y catalogado en las diferentes partes según una primera inspección visual. Posterior toma de muestras con pesado y preparación para su análisis instrumental.

En la DSC se posiciona la muestra a analizar y una referencia en recipientes específicos. El instrumento aumenta la temperatura de forma controlada (por ejemplo, $5^{\circ}\text{C min}^{-1}$) y mide la diferencia en el flujo de calor necesario para alcanzar la misma temperatura en la muestra y la referencia. Los cambios físicos (fusiones, cristalizaciones) o químicos (reacciones químicas) pueden liberar o producir calor, lo que afecta al flujo de calor. Cuando se produce un cambio de fase o estado de agregación se produce una absorción o desprendimiento de energía frente al otro material que se utiliza como referencia y que no sufre cambios.

Para el caso de los materiales plásticos, se pueden dar tres tipos de transiciones térmicas (Figura 4.7) y a las temperaturas a las que transcurren se las denomina:

Temperatura de Transición vítrea (T_g), es el punto en el que un material amorfo (no cristalino) cambia de un estado rígido y quebradizo a un estado más flexible y viscoso. Es característica de materiales amorfos como polímeros vítreos, vidrios y algunos plásticos. En la T_g no hay un cambio de fase definido, sino que es el resultado de un cambio

en la movilidad molecular a medida que el material se calienta. En un termograma de DSC para un plástico amorfó como el polimetilmetacrilato (PMMA), la T_g se manifiesta como un salto en la línea base. El punto de inflexión corresponde a la temperatura de la transición vítrea [130, 131].

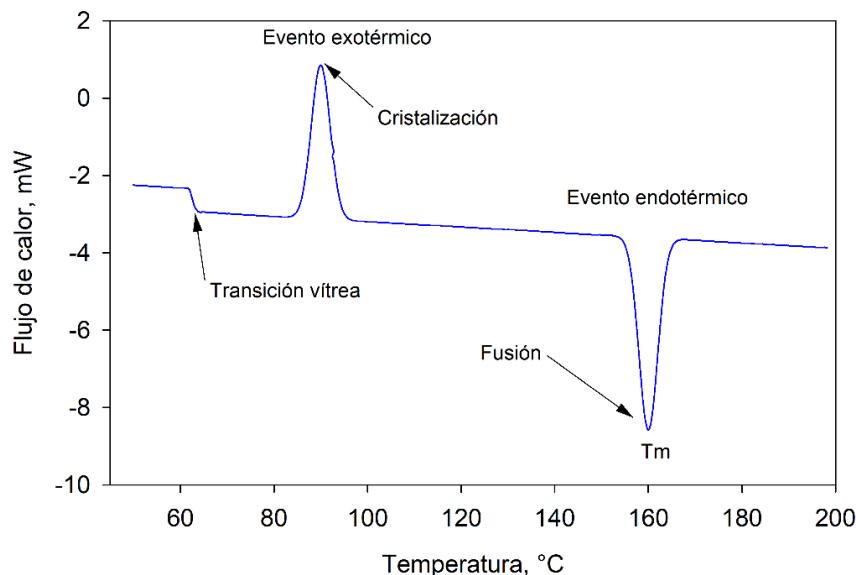


Figura 4.7: Eventos posibles en el estudio con DSC de un material polimérico. Adaptado de [110].

Temperatura de Fusión (T_m), es el punto en el que un material cristalino o semicristalino pasa de estado sólido a líquido. Es característica de materiales cristalinos y semi-cristalinos, donde las moléculas tienen una estructura ordenada que puede fundirse. En un termograma de DSC de un plástico semicristalino como el polietileno de baja densidad (LDPE), la T_m aparece como un pico endotérmico cuyo valor nos indica la temperatura de fusión. En el caso de los polímeros semicristalinos, el área del pico permite cuantificar el grado de cristalinidad del material. Hay que señalar que algunos plásticos como el polipropileno (PP) pueden existir tanto en forma amorfá como semicristalina.

En algunos termogramas de DSC de un plástico aparece un pico exotérmico (T_d), las causas más comunes se deben a la cristalización y a reacciones de degradación o descomposición. La cristalización es un proceso exotérmico, ya que la liberación de energía ocurre cuando las moléculas del polímero se organizan en una estructura más ordenada. Por otra parte, cuando se exponen los plásticos a temperaturas elevadas pueden

4. METODOLOGÍA

sufrir reacciones de degradación o descomposición que implican la ruptura de enlaces químicos en el polímero y en la liberación de calor.

La Figura 4.8 muestra las características de fusión de cuatro tipos de polietileno, mostrando la temperatura y el pico de fusión de cada uno de ellos.

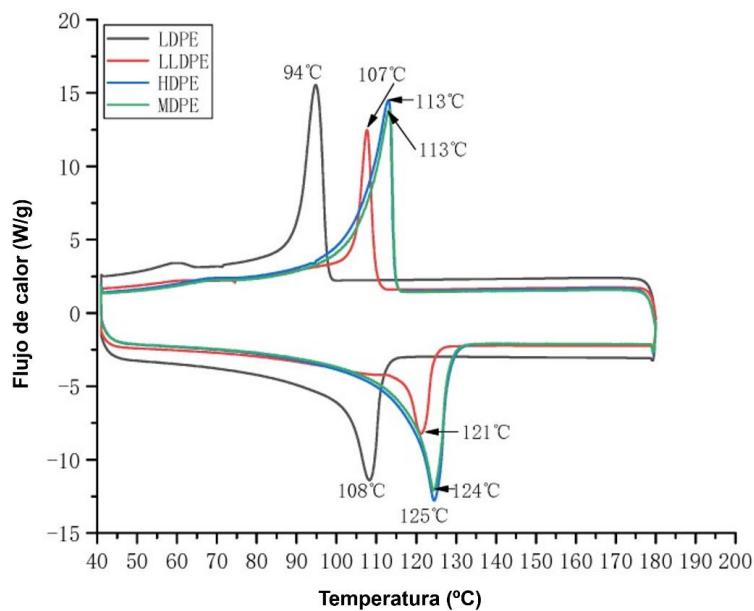


Figura 4.8: Calorimetría diferencial de barrido de cuatro tipos de polietileno. (polietileno de baja densidad, baja densidad lineal, alta densidad y media densidad, LDPE, LLDPE, HDPE, MDPE, respectivamente). Adaptado de [132].

Procedimiento

El análisis mediante DSC se llevó a cabo en un equipo Perkin-Elmer DSC 8000 (Figura 4.9). Las muestras (entre 5 y 10 mg) se depositaron en unas cápsulas de aluminio que se sellaron mediante una prensa antes de introducirlos en las cámaras del equipo de DSC. Como referencia se utilizó una cápsula vacía. La atmósfera que rodea la muestra y el material de referencia se controló bajo una corriente de nitrógeno que, por su naturaleza inerte, evita la presencia de oxígeno, y así consigue no afectar a las reacciones químicas y resultados térmicos. Se realizaron tres barridos térmicos en total en los que, tanto para el calentamiento, como para el enfriamiento, la temperatura variaba a una velocidad constante de $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. En el primer barrido se realizó un acondicionamiento de las muestras. En este, partiendo de la temperatura ambiente, se calentaron hasta $240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este ciclo se realizó

para eliminar o reducir la influencia de la historia térmica de la muestra, permitiendo obtener medidas más reproducibles y consistentes en los ciclos subsiguientes. A continuación, se registraron dos termogramas adicionales, en el primero la muestra se enfrió desde 240 °C hasta -80 °C y en el segundo la muestra se calentó desde -80 °C hasta 240 °C. Este enfoque permitió estudiar las transiciones térmicas en ambas direcciones para obtener una visión completa del comportamiento térmico de la muestra. Los resultados del segundo calentamiento son más significativos ya que se ha eliminado la posible influencia de la historia térmica de la muestra.

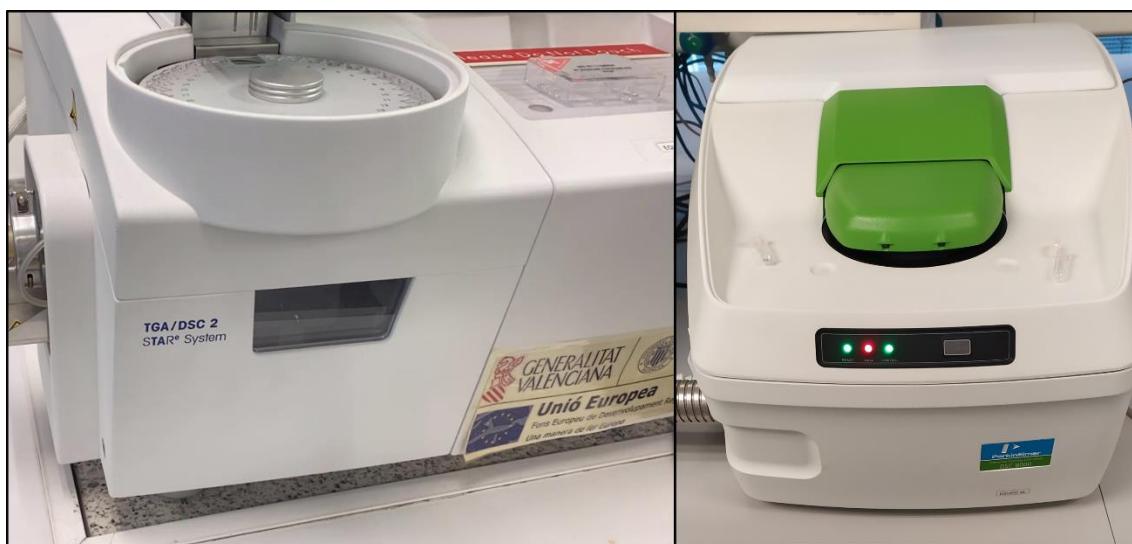


Figura 4.9: Instrumentación utilizada en los estudios térmicos. A la izquierda el equipo de análisis termogravimétrico utilizado. A la derecha el calorímetro diferencial de barrido.

Del análisis de los termogramas se obtuvo la temperatura a la cual una sustancia cambia de estado sólido a líquido durante el proceso de calentamiento (temperatura de fusión, T_m) a partir del segundo termograma de calentamiento, que asegura que cualquier influencia de la historia térmica de la muestra ha sido minimizada o eliminada. Por último, se obtuvo temperatura a la cual el polímero transita de un estado vítreo y rígido a uno más flexible (temperatura de transición vítreo, T_g).

Los valores de T_m y T_g de las muestras se compararon con los que aparecen en la bibliografía para los distintos tipos de plásticos con el fin de determinar la naturaleza de la muestra.

4. METODOLOGÍA

4.1.1.4. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico es una técnica muy utilizada para estudiar la composición y la estabilidad térmica de los materiales plásticos. Permite determinar la temperatura de descomposición de los plásticos mediante la medida del cambio de masa de una muestra que se calienta de manera controlada. Durante el análisis, el equipo de TGA registra continuamente la masa de la muestra mientras se calienta. La temperatura se aumenta gradualmente y se registra la pérdida de masa de la muestra a medida que ocurre la descomposición. Los cambios de masa producidos se aprecian en un registro (termograma) en el que se observa una disminución abrupta en la masa de la muestra. La temperatura correspondiente al punto donde el descenso es más acusado, punto de inflexión, se considera la temperatura de descomposición del plástico. Como en ocasiones es muy difícil asignar de forma exacta este punto, es muy común representar la primera derivada del termograma. La primera derivada se utiliza comúnmente para resaltar los puntos de inflexión o cambios abruptos en la curva de pérdida de masa, ya que, en la gráfica de la primera derivada, la temperatura del punto de inflexión aparece como un pico. En los estudios sobre polímeros, los termogramas proporcionan información sobre los mecanismos de descomposición de diversas preparaciones poliméricas, y por ello pueden utilizarse con fines de identificación de determinados polímeros [110]. Esta capacidad la convierte en una técnica óptima para obtener la composición de materiales utilizados en la producción de dispositivos de uso médico cuando el fabricante no aporta esta información. La Figura 4.10 muestra los patrones de descomposición de cuatro polímeros obtenidos por termogravimetría [133].

Procedimiento

Las medidas de TGA se realizaron en un sistema *T.A. Instruments SDTQ600* (Figura 4.9). Como recipientes de muestra de las pruebas de TGA se utilizaron crisoles de alúmina, un material cerámico que se utiliza por ser químicamente inerte y presentar resistencia a altas temperaturas. Las muestras, con un peso de entre 5 y 10 mg, se calentaron desde 30 hasta 800 °C con una rampa de aumento de temperatura constante de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Esta velocidad de calentamiento controlada permite estudiar las transiciones térmicas y los cambios en la masa de las muestras. El equipo aplica un flujo de nitrógeno de $20\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ durante el análisis, proporcionando un entorno controlado que evita la oxidación o reducción termo-oxidativa de la muestra.

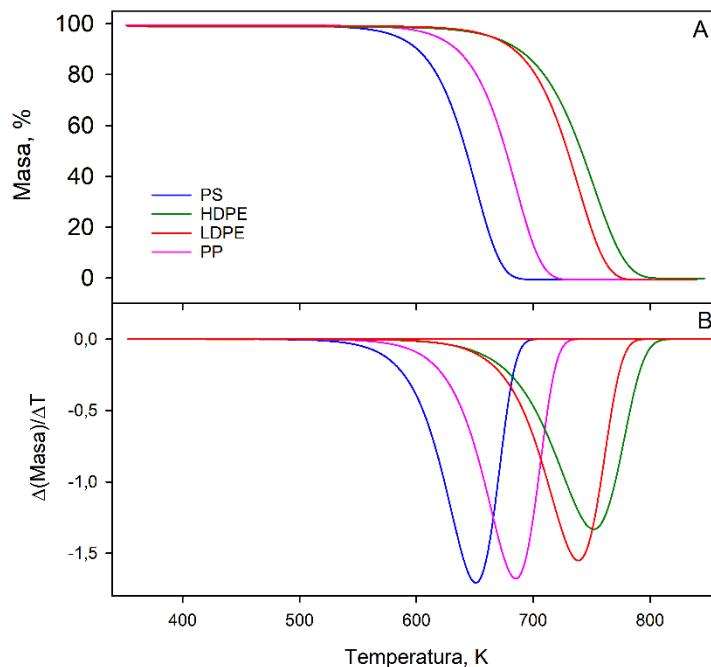


Figura 4.10: A) Termogramas de algunos materiales poliméricos comunes. (Poliestireno, PS; polipropileno, PP; polietileno de baja densidad, LDPE; polietileno de alta densidad, HDPE). B) primera derivada de los cambios de masa con la temperatura para los termogramas mostrados en A. Adaptado de [133].

La temperatura de descomposición (T_d), se obtuvo a partir de la temperatura de los picos en las curvas de la primera derivada. Los valores de T_d de las muestras se compararon con los que aparecen en la bibliografía para los distintos tipos de plásticos para determinar la naturaleza de la muestra.

4.1.1.5. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica que estudia las vibraciones moleculares de los grupos funcionales de las moléculas en la región del infrarrojo del espectro electromagnético.

En un espectrómetro FTIR, la luz infrarroja (IR) pasa a través de una muestra. Dependiendo del tipo de vibración y del grupo funcional se produce la absorción de la radiación a diferentes longitudes de onda. La FTIR obtiene información química mediante

4. METODOLOGÍA

la detección de los modos de vibración de las moléculas de la muestra a diferentes frecuencias infrarrojas. Como la energía a estas longitudes de onda es muy baja y resulta preciso medir con seguridad la frecuencia de las distintas longitudes de onda, se acopla al sistema el interferómetro de Michelson. Los interferogramas recogidos por el detector son tratados matemáticamente mediante la Transformada de Fourier que los convierte en un espectro convencional frente al número de onda, en el que los picos de absorbancia o transmitancia característicos corresponden a enlaces químicos específicos o vibraciones moleculares. De esta forma se consigue la modulación de las frecuencias y una mayor sensibilidad y seguridad en los resultados.

Al analizar estas señales, podemos decir qué grupos funcionales están presentes y cómo están conectadas entre sí. Es como tomar una "huella digital molecular" para identificar sustancias químicas [110]. La FTIR es una de las técnicas analíticas estándar más utilizadas para identificar polímeros sintéticos basándose en sus espectros de vibración molecular característicos y representa una herramienta no destructiva para la caracterización de plásticos, macroplásticos (MPs) y nanoplásticos (NPs) extraídos de muestras medioambientales [109, 111].

La Figura 4.11 muestra la cantidad de radiación infrarroja que pasa a través de polímeros plásticos en función de la frecuencia de las ondas infrarrojas, midiendo así la vibración de las moléculas de estas sustancias y de ese modo obtener información sobre su composición estructural [134].

Existen cuatro técnicas de análisis de muestras en FTIR: transmisión, reflectancia difusa, reflectancia especular verdadera/reflexión-adsorción y reflectancia total atenuada (ATR-FTIR), siendo esta última una de las más utilizadas y la usada en esta Tesis Doctoral.

El modo ATR-FTIR, es una metodología de muestreo que permite el examen directo de muestras sólidas o líquidas sin preparación adicional. El sistema requiere de un cristal atenuador que ha de estar en contacto directo con la muestra (Figura 4.12). La luz IR entra en el cristal de atenuación ATR con un ángulo adecuado y se refleja totalmente en la interfaz cristal-muestra. La reflexión interna forma una onda evanescente que se atenúa a medida que la muestra absorbe energía y después de una o múltiples reflexiones internas, la luz IR sale del cristal hacia el detector para generar el espectro IR [109, 135].

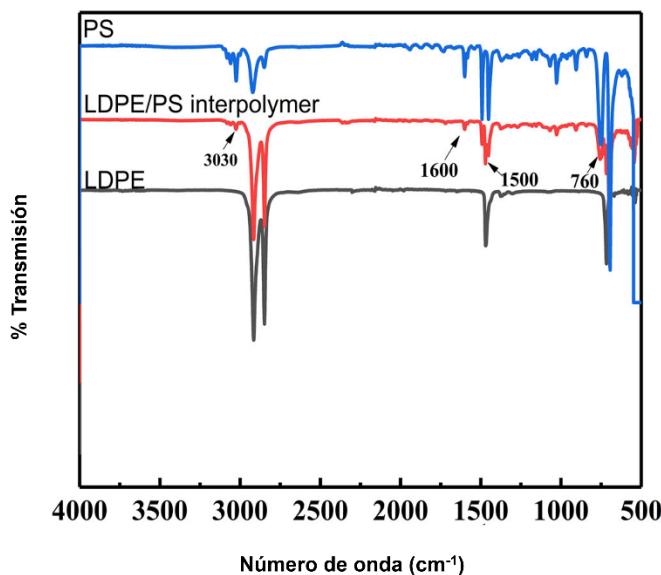


Figura 4.11: Espectro FTIR de polímeros plásticos como LDPE, PS y una mezcla de ambos. (polietileno de baja densidad, LDPE; poliestireno, PS). Adaptado de [134].

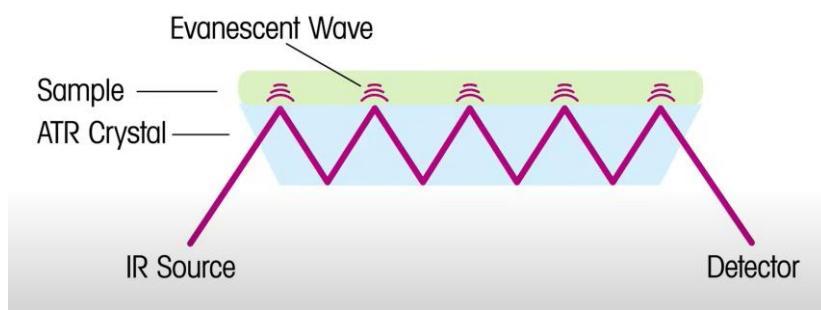


Figura 4.12: Esquema de una sección transversal de un elemento ATR trapezoidal multirreflexión. Adaptado de [135] y de Mettler-Toledo [136].

Procedimiento

Se realizó un análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier en modo de reflexión atenuada (ATR-FTIR), que utiliza un cristal con un índice de refracción mayor que el de la muestra para mejorar la interacción de la luz infrarroja. Esto permite realizar medidas directamente sobre muestras sólidas o líquidas en contacto con la superficie del cristal. Se utilizó un espectrómetro *Bruker* modelo *Alpha I*, cubriendo un rango de número de onda de 4000 a 400 cm⁻¹.

4. METODOLOGÍA

Durante la adquisición del espectro, se realizaron 24 escaneos. Cada escaneo contribuye a mejorar la relación señal-ruido del espectro. Se utilizó una resolución de 4 cm⁻¹, una capacidad relativamente alta para discernir detalles finos en el espectro.

Las características discriminatorias en los espectros FTIR y los espectros de referencia contenidos en las bibliotecas permiten una cómoda identificación de los tipos más comunes de polímeros.

4.1.1.6. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) con detector de energía dispersiva de Rayos X (EDX)

Mientras que las técnicas de TGA, DSC y FTIR son ampliamente utilizadas para el análisis de polímeros plásticos, la Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) junto con la detección de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) se utilizan habitualmente para determinar la composición de materiales metálicos. Son técnicas complementarias utilizadas en microscopía electrónica para el análisis de muestras.

El microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, a diferencia de un microscopio electrónico de barrido convencional, utiliza un cañón de emisión de campo que genera un haz de electrones de alta y baja energía extremadamente focalizado por lo que proporciona imágenes de una resolución espacial excepcionalmente alta que posibilita la observación detallada de la topografía superficial y la morfología de diversos materiales, incluyendo estructuras nanométricas. Además, se puede trabajar a potenciales muy bajos (0.02-5 kV) lo que evita daños en la muestra por efecto del haz de electrones.

Una característica importante de los microscopios tipo FESEM es la utilización de detectores dentro de la lente. Se pueden utilizar distintos tipos de detectores, entre los que cabe destacar los espectrómetros de energía dispersiva de Rayos X (EDX o XEDS). El acoplamiento FESEM/EDX proporciona ventajas significativas en el análisis de materiales, ya que permite a los investigadores correlacionar la información topográfica obtenida a partir de imágenes FESEM con la información de la composición elemental obtenida a partir de EDX.

El material irradiado con el haz de electrones del microscopio electrónico disipa parte de la energía absorbida expulsando un electrón de las capas internas del átomo, como

consecuencia un electrón de mayor energía de la capa exterior ocupa su lugar, liberando la diferencia de energía en forma de Rayos X con un espectro característico basado en su átomo de origen. Esto permite analizar la composición de la muestra que ha sido excitada por la fuente de energía. Estos Rayos X emitidos son detectados y analizados para identificar los elementos y cuantificar sus concentraciones en la muestra (Figura 4.13). Todo ello proporciona una información detallada sobre los elementos presentes y sus proporciones en la muestra analizada [137].

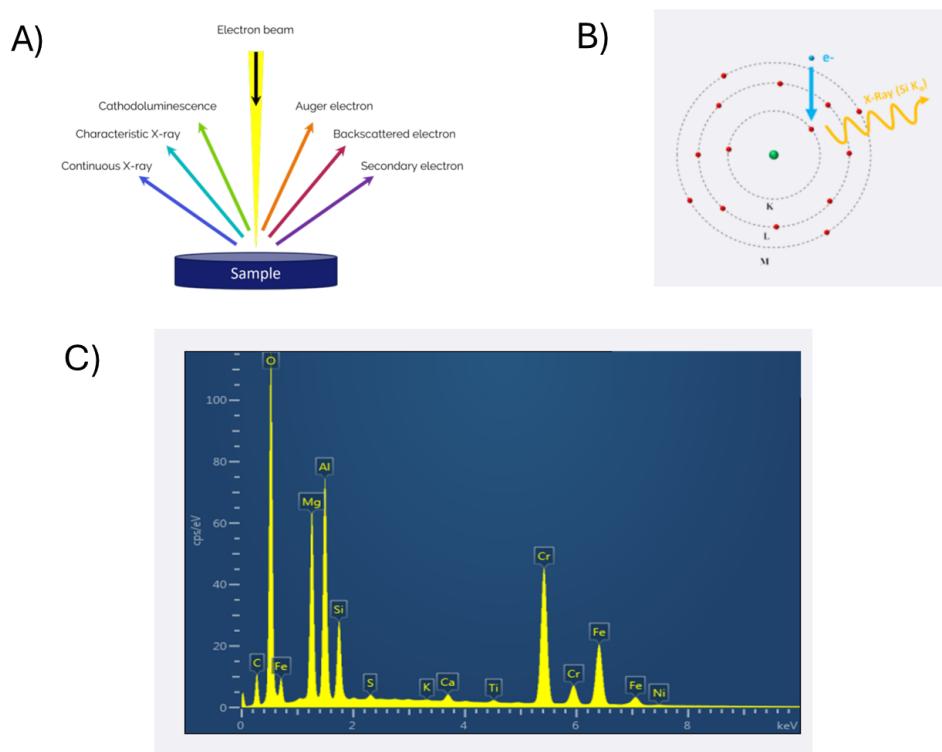


Figura 4.13: Esquema sobre el análisis de la composición de una muestra por FESEM / EDX. A) La interacción del haz de electrones del microscopio sobre la muestra produce electrones, Rayos X y luz visible-UV. B) Imagen que muestra la generación de Rayos X. C) Imagen de un espectro EDX de una muestra metálica. Imagen adaptada de la información proporcionada por Oxford Instruments Group. (<https://nano.oxinst.com/campaigns/what-is-eds/edx>)

Esta combinación es especialmente útil en campos como la nanotecnología, la ciencia de los materiales, la geología y la ciencia forense, donde es crucial comprender la estructura y la composición de los materiales.

La Figura 4.14 muestra un ejemplo de las técnicas FESEM / EDX para estimar las diferentes proporciones de hierro, cromo y níquel, y así identificar un tipo concreto de acero inoxidable [112].

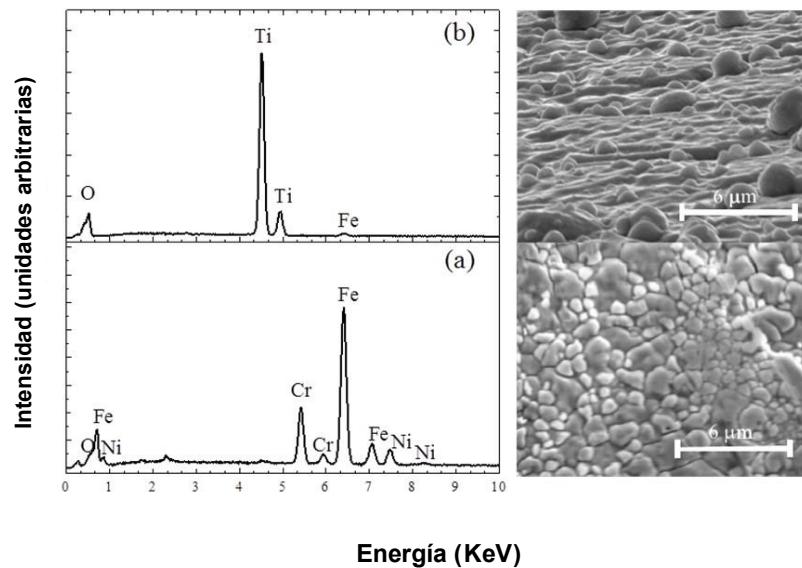


Figura 4.14: Imágenes de FESEM (derecha) y el correspondiente espectro EDXRF (izquierda) de una muestra de acero inoxidable (a) y titanio oxidado (b). Adaptado de [112].

Procedimiento

Se utilizó un microscopio FESEM ZEISS modelo *Ultra-55* (Figura 4.15). Para una obtención de imágenes detalladas de microscopía electrónica, se aplicó una tensión de aceleración al haz de electrones de 30 kilovoltios (kV) y una corriente de 500 picoamperios (pA). El tiempo en que el haz de electrones incidió sobre la superficie de la muestra (tiempo de exposición para la adquisición de datos) se estableció en 4 minutos para cada muestra. La composición de las partes metálicas fue analizada mediante el detector EDX (*Oxford Instruments*).

4.1.2. Análisis de ciclo de vida de accesorios fungibles en endoscopia digestiva

4.1.2.1. Introducción al análisis de ciclo de vida

Una vez finalizado el análisis de la composición, tras la estimación del peso y el tipo de material empleado, se realizó un estudio del impacto medioambiental de todas las etapas del ciclo de vida de los accesorios fungibles. Para ello se utilizó un modelo *cradle-to-grave* en términos de huella de carbono en kgCO₂-eq.



Figura 4.15: Microscopio electrónico FESEM Zeiss Ultra-55

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología que se utiliza para evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o actividad a lo largo de su vida útil, desde la extracción de materias primas hasta gestión de residuos. Esto implica dividir el ciclo completo del producto o proceso en diferentes etapas, como la extracción de materias primas, la fabricación, el transporte, el uso y el desecho. Para entender los flujos, procesos y sistemas involucrados en un ACV, es importante considerar los siguientes elementos:

- **Flujos:** Los flujos se refieren a las entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) de materiales, energía y residuos en cada etapa del ciclo de vida. Estos flujos pueden incluir materias primas, agua, energía eléctrica, combustibles, emisiones atmosféricas, efluentes líquidos, residuos sólidos, entre otros. Es fundamental identificar y cuantificar estos flujos para comprender cómo interactúan con el medio ambiente en cada etapa del ciclo de vida. Los flujos de entrada son los materiales y recursos que se requieren para llevar a cabo un proceso en particular que, en nuestro caso, serían las materias primas que hemos obtenido mediante la caracterización de las propiedades de los materiales (polietilenos, resinas, metales, etc.), agua, energía eléctrica y combustibles necesarios en su fabricación. Los flujos

4. METODOLOGÍA

de salida son los resultados o productos que se generan como consecuencia de este proceso. Estos pueden ser productos terminados (en nuestro caso los accesorios de endoscopia), pero también emisiones de GEI, residuos sólidos o líquidos generados a partir de este proceso.

- **Procesos:** Los procesos son las actividades específicas en sí que ocurren en cada etapa del ciclo de vida. Cada proceso tiene flujos de entrada y de salida y pueden ser la extracción de materias primas, la fabricación, el transporte, el uso y la disposición final. Cada proceso implica una serie de actividades y operaciones que consumen recursos y generan impactos ambientales. El análisis de cada proceso por separado y las emisiones que generan permite calcular el total del impacto del análisis del ciclo de vida. Los procesos de nuestro análisis de ciclo de vida son la fabricación de los accesorios, su transporte desde el lugar de producción hasta nuestras unidades de endoscopia, y el tratamiento de residuos de estos accesorios, mediante incineración a alta temperatura.
- **Sistemas:** El sistema en un ACV se refiere al alcance y límites del análisis. Esto implica definir claramente qué se está evaluando y qué se está excluyendo. Permite considerar el horizonte temporal del análisis y tener una visión completa y precisa de los flujos y procesos involucrados en el ciclo de vida del producto o proceso.

Determinamos como indicador principal del impacto ambiental antropogénico, para el público en general, el potencial de calentamiento global (GWP) en términos de la huella de carbono (medida en kgCO₂-eq), durante un período específico de 100 años. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el GWP representa la capacidad de retención de calor de los gases de efecto invernadero, pero no es el único factor a considerar en la sostenibilidad de un material [138]. La producción, procesamiento, durabilidad, reciclaje y otros aspectos también son cruciales para una evaluación integral de la sostenibilidad de un material. Las emisiones de GEI se convirtieron a kgCO₂-eq.

La huella de carbono se estimó utilizando un software gratuito de ACV, openLCA V.2.0.3 (*GreenDelta GmbH, Alemania*). Este software evalúa los efectos que un producto tiene en el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida completo, mostrando diferentes aspectos de la salud humana y ambiental, como el cambio climático global en términos de emisiones de carbono, pero también otros indicadores ambientales, como acidificación, eutrofización, radiación ionizante, depleción de la capa de ozono, uso de agua y recursos.

Las bases de datos de ACV utilizadas para el análisis del inventario del ciclo de vida fueron *EF Secondary Data sets V. EF 2.0*. El método de evaluación de impacto utilizado fue *EF (midpoint indicator)*. Se analizaron las cuatro fases principales del ciclo de vida de este tipo de dispositivos según la norma ISO 14040, considerando un producto terminado como la unidad funcional, incluido el embalaje (Figura 4.16). Esto nos permitió seleccionar una serie de procesos y realizar un análisis de inventario de openLCA, que se asignarían a cada accesorio endoscópico, junto con la masa correspondiente, en lugar de asumir que todo el dispositivo está hecho de un solo material.

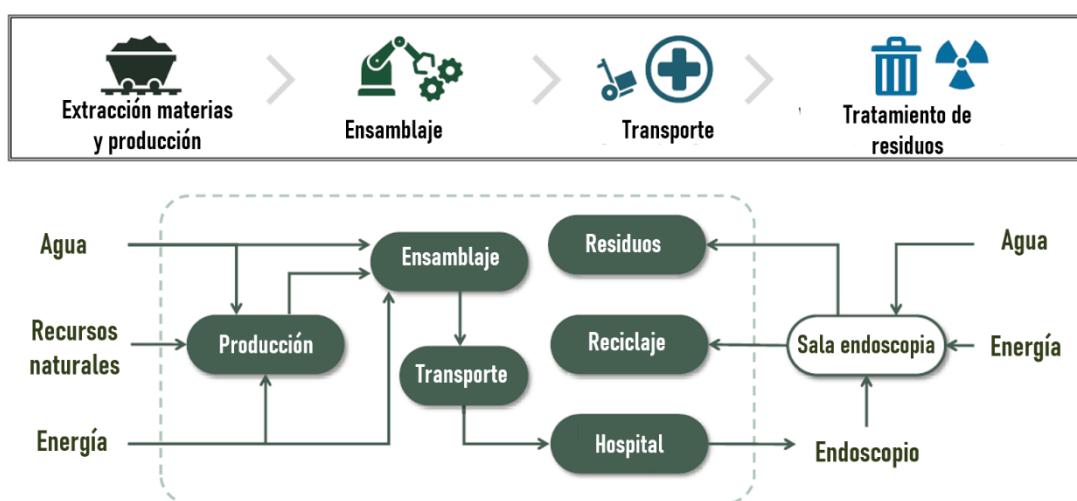


Figura 4.16: Fases evaluadas en el análisis de ciclo de vida y diagrama de flujo del sistema de productos. Adaptado de [139].

4.1.2.2. Análisis de inventario y estimaciones medioambientales

Para realizar un análisis de inventario de la producción de cada uno de los accesorios de endoscopia digestiva, tenemos que crear un producto, como por ejemplo “fabricación de asa de polipectomía (A)”, que deberá disponer de flujos de entrada (*inputs*) y salida (*outputs*), donde el *output* constituye el asa de polipectomía ya fabricada (Figura 4.17).

Una vez creado el producto que queremos detallar, en los flujos de entrada (*inputs*) debemos introducir el peso y la composición material de las diferentes estructuras de cada

4. METODOLOGÍA

accesorio de endoscopia (Figura 4.18). En el caso del asa (A), el análisis del material determinó que la composición era mayoritariamente polietilenos de baja y alta densidad (LDPE y HDPE del inglés *low and high density polyethylene*), polipropileno (PP) y acero inoxidable (SS del inglés *stainless steel*).

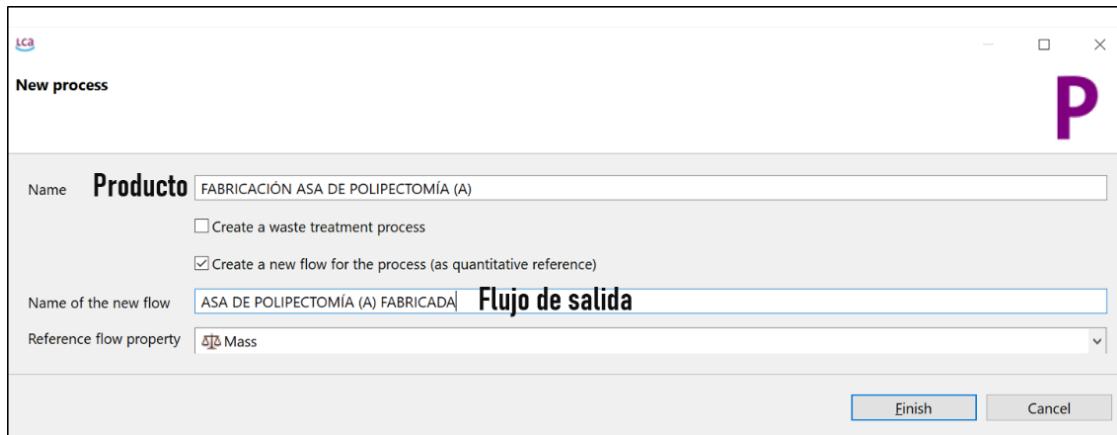


Figura 4.17: Creación de un producto, con su flujo de salida correspondiente mediante el software openLCA.

Si deseamos calcular los impactos ambientales únicamente de la fabricación de un dispositivo por separado, una vez creado el producto, debemos sintetizar el sistema para aplicarle un método de evaluación del impacto, generar resultados medioambientales y modelos gráficos (Figura 4.19). Esto nos proporciona una representación completa y detallada del sistema en el que un producto está inmerso, permitiendo una evaluación integral de los impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida:

- Permite modelar no solo el producto en sí, sino todo el sistema de producción y consumo que rodea ese producto. Esto incluye las materias primas, los procesos de fabricación, el transporte, el uso del producto y la gestión de residuos al final de su vida útil.
- Puede identificar las contribuciones específicas de cada proceso al impacto total del producto en términos de emisiones de GEI, consumo de recursos, contaminación, entre otros.
- Posibilita realizar comparaciones detalladas entre diferentes escenarios de producción y consumo. Esto facilita la identificación de áreas críticas y oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad ambiental.

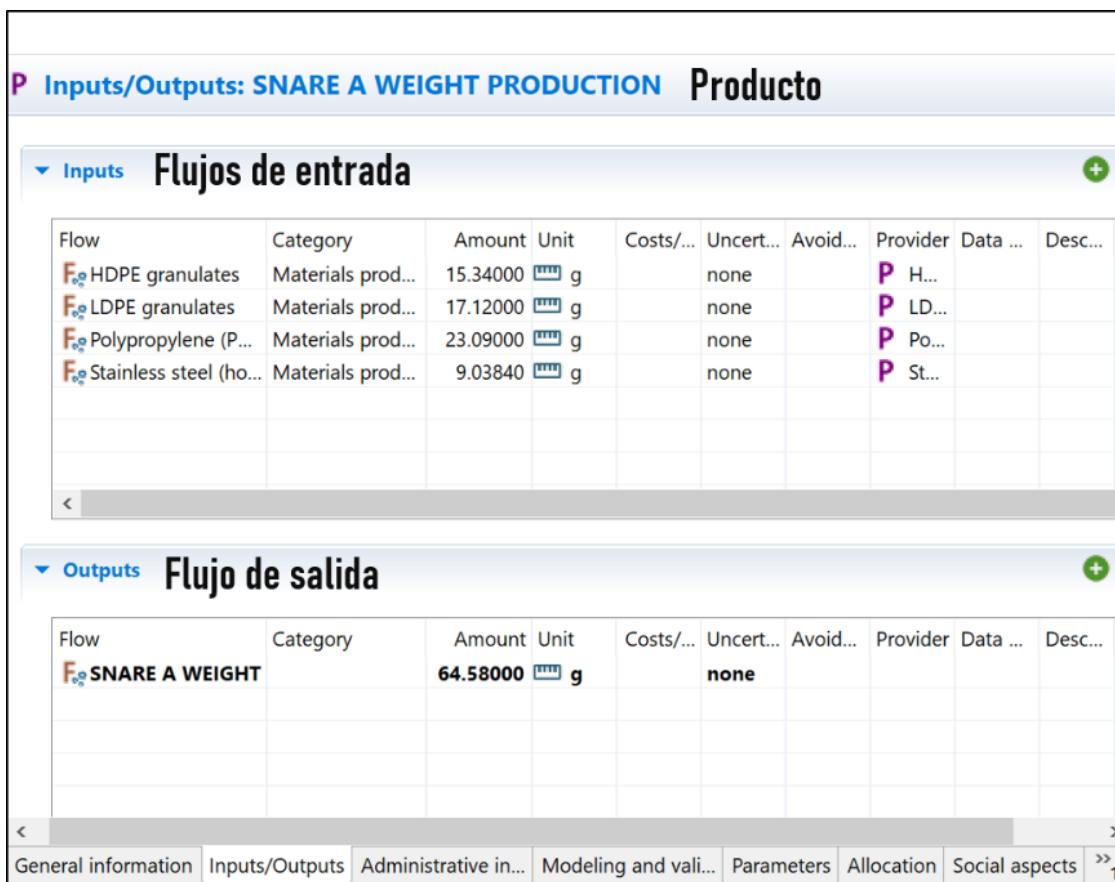


Figura 4.18: Constitución de los flujos de entrada y de salida de un producto (fabricación del asa de polipectomía (A)) mediante el software openLCA.

Determinar el impacto medioambiental del transporte de los productos dentro de un ACV es crucial, ya que puede contribuir significativamente a las emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos. Además, permite evaluar diferentes modos de transporte (por ejemplo, carretera, ferrocarril, barco, avión) y rutas para identificar las opciones más sostenibles. Por último, el transporte puede ser un "hot spot" o punto crítico en el ciclo de vida de un producto. Identificar estas áreas permite a las empresas y diseñadores centrarse en la optimización de sostenibilidad [118]. En nuestro caso, conociendo el lugar de producción, información aportada por los fabricantes en el embalaje, estimamos de forma aproximada las rutas internacionales más habituales, tanto por tierra como por mar. Concretamente, los accesorios serían transportados desde las ubicaciones de los productores (A-D) hasta el Hospital Universitario y Politécnico La Fe, en Valencia, España [140] (Tabla 4.1). Asumimos el transporte continental mediante camión de combustible diésel desde el lugar de fabricación hasta el puerto internacional más cercano, y el

4. METODOLOGÍA

P General information: SNARE A Producto

General information

Name: SNARE A

Description:

Infrastructure process **Crear sistema**

Create product system Direct calculation

LCA Calculation properties

General information: SNARE A Sistema

Name: SNARE A

Description: First created: 2022-03-13T17:19:49
Linking approach during creation:
Prefer default providers;
Preferred process type:
Unit process

Tags

Calculation properties

Please select the properties for the calculation

Allocation method: None

Impact assessment method: Environmental Footprint (Mid-point indicator)

Normalization and weighting set: [empty]

Calculation type: Quick results Analysis Regionalized LCIA Monte Carlo Simulation

Include cost calculation Assess data quality

Calcular impactos

Figura 4.19: Creación de un sistema a partir del producto (fabricación del asa de polipectomía (A)) y cálculo de impactos medioambientales derivados.

transporte mediante barco de carga desde este puerto internacional hasta el puerto de Valencia. No tuvimos en cuenta posibilidad de transporte y distribución a sedes intermedias antes de llegar al hospital ni el transporte de los RBM al lugar de incineración.

Para el cálculo de impactos medioambientales de la fabricación y el transporte combinados, se crearon productos y sistemas añadiendo los flujos de entrada derivados del transporte de mercancías (combustibles, medios de transporte, factor humano). Por ejemplo, para el asa de polipectomía (B), los flujos de entrada son el asa ya fabricada y los transportes mediante camión y barco de carga, con el peso determinado del accesorio y los kilómetros a recorrer. Cuando creamos el sistema que incluye estos dos productos, podemos generar modelos gráficos como diagramas de los flujos de entrada y salida

(Figura 4.20).

Tabla 4.1: Rutas comerciales aproximadas desde los lugares de fabricación

Fabricante	Origen	Ruta terrestre (km en camión diésel)	Ruta marítima (km en barco de carga)
(A)	Ho Chi Minh, Vietnam	-	14000
(B)	San José, Costa Rica	800	8000
(C)	Indianápolis, EEUU	1200	6000
(D)	Yangzhou, China	-	18000

Basándonos en información general de la industria y del fabricante, se realizaron varias suposiciones para estimar las emisiones de carbono del ensamblaje y el tratamiento de residuos de los accesorios endoscópicos y sus materiales. Aunque las operaciones necesarias para el ensamblaje industrial de los accesorios no son triviales, no se encontraron bases de datos sobre este tipo de información para el software openLCA, por lo que se despreciaron entendiendo que el impacto es similar para los diferentes accesorios (unos 0,05-0,2 kgCO₂-eq) [141, 142].

Al tratarse RBM, la incorporación de accesorios endoscópicos fungibles requiere su eliminación mediante incineración a alta temperatura. Las emisiones al final de la vida útil se aproximan sobre la información más reciente disponible en la literatura sobre los flujos de residuos [16, 74, 143]. Se estimó que la incineración de RBM generales era de 1,074 kgCO₂-eq/kg para materiales no plásticos [18]. Para los materiales plásticos destinados a la incineración, existen varias estimaciones que oscilan entre 3 y 6 kgCO₂-eq/kg [143, 144]. Se asumió el peor escenario medioambiental.

4.1.2.3. Evaluación e interpretación del impacto medioambiental

Cuando los flujos, productos y sistemas están establecidos, a partir de las bases de datos públicas de impactos medioambientales derivados de transporte y producción, realizamos una evaluación de la huella de carbono y otros indicadores medioambientales. El software ofrece resultados de todos los indicadores medioambientales por cada producto (Figura 4.21), pero también la contribución específica de cada flujo de entrada a un

4. METODOLOGÍA

indicador medioambiental determinado (Figura 4.22).

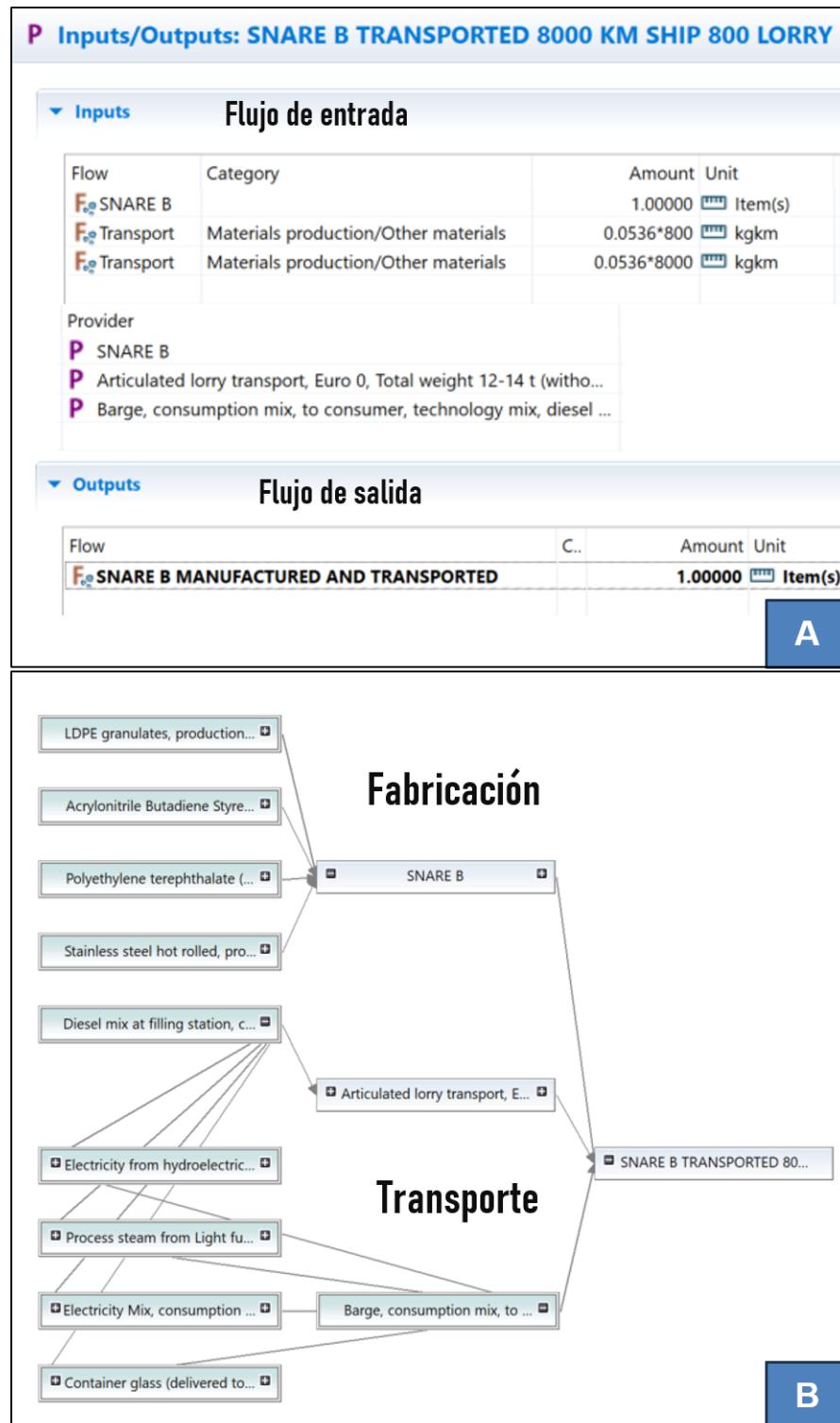


Figura 4.20: Creación de un producto y sistema que aglutine la fabricación y el transporte (A), junto con el modelo gráfico de flujos de entrada y salida del sistema completo (B).

Name	Category	Inventory...	Impact f...	Impact result	Unit
> Human toxicity, non-cancer				1.32684E-6	CTUh
> Climate change-Land use and land				0.00258	kg CO2 eq
> Resource use, fossils				67.42148	MJ
> Land use				-4.20872	Pt
> Climate change-Biogenic				0.00495	kg CO2 eq
> Resource use, minerals and metals				0.00012	kg Sb eq
> Water use				1.31473	m3 depriv.
> Climate change				3.71991	kg CO2 eq
> Particulate Matter				2.86076E-7	disease inc.
> Ecotoxicity, freshwater				2.01146	CTUe
> Eutrophication, freshwater				4.57426E-5	kg P eq
> Acidification				0.02019	mol H+ eq
> Human toxicity, cancer				4.62396E-8	CTUh
> Photochemical ozone formation - h				0.01004	kg NMVOC eq
> Climate change-Fossil				3.71239	kg CO2 eq
> Eutrophication, terrestrial				0.03186	mol N eq
> Eutrophication marine				0.00310	kg N eq
> Ionising radiation, human health				0.15211	kBq U-235 eq
> Ozone depletion				9.40778E-9	kg CFC11 eq

Figura 4.21: Indicadores medioambientales sobre los que aporta información openLCA una vez realizado un ACV.

Cada sistema de evaluación de impacto ofrece unos indicadores medioambientales diferentes, en nuestro caso utilizamos *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*. Estos resultados nos permiten realizar comparaciones con productos o procesos alternativos, identificar áreas como *hotspots* donde se contribuye especialmente a los impactos medioambientales y se pueden hacer mejoras al respecto. Analizar la sensibilidad de los resultados a cambios en los flujos de entrada es relevante para comprender qué efectos tendrían los cambios que estableceríamos en el transporte o la producción de los materiales. Esto ayuda a comprender la robustez de los resultados y a identificar las áreas donde se necesitan datos más precisos.

La interpretación del ACV puede ser compleja y es recomendable contar con experiencia en la interpretación de los resultados de análisis de ciclo de vida. Además, la transparencia en la metodología y la presentación de los resultados es fundamental para la validez y utilidad del análisis.

4. METODOLOGÍA



Figura 4.22: Huella de carbono en kgCO₂-eq de la producción de la pinza de biopsia (C), estratificado por impacto ecológico del uso de cada material.

4.2. Intervención de sostenibilidad en una Unidad de endoscopia y evaluación de su impacto

4.2.1 Hipótesis de intervención de sostenibilidad (Green Mark)

Nuestra hipótesis para desarrollar una intervención de sostenibilidad se basa en una simple propuesta: algunas partes del instrumento podrían no considerarse RBM. A partir de una determinada “marca verde o *green mark*”, parte del cuerpo del accesorio y el mango no están en contacto con fluidos o secreciones del paciente, ya que no entran por el canal de trabajo del endoscopio, y por ello no sería necesario desecharlos mediante incineración a alta temperatura, que es el método de gestión de residuos más contaminante. Si somos capaces de identificar las partes no contaminadas, separarlas y realizar un método de gestión de residuos diferente, realizaríamos intervenciones en un punto crítico del ACV al disminuir la cantidad de masa llevada a incineración, pudiendo reciclar estos materiales a través del fabricante o desecharlos de un modo más sostenible.

Realizamos un experimento durante 30 exploraciones consecutivas para gastroscopio y para colonoscopio para determinar qué longitud del cuerpo del accesorio endoscópico queda dentro del canal de trabajo y delimitar un área segura no contaminada. Desde este lugar, determinamos una marca (*green mark*), como una medida separada 5 cm del contacto con el canal de trabajo, para poder seccionar y separar las partes del accesorio potencialmente reciclables (Figura 4.23).

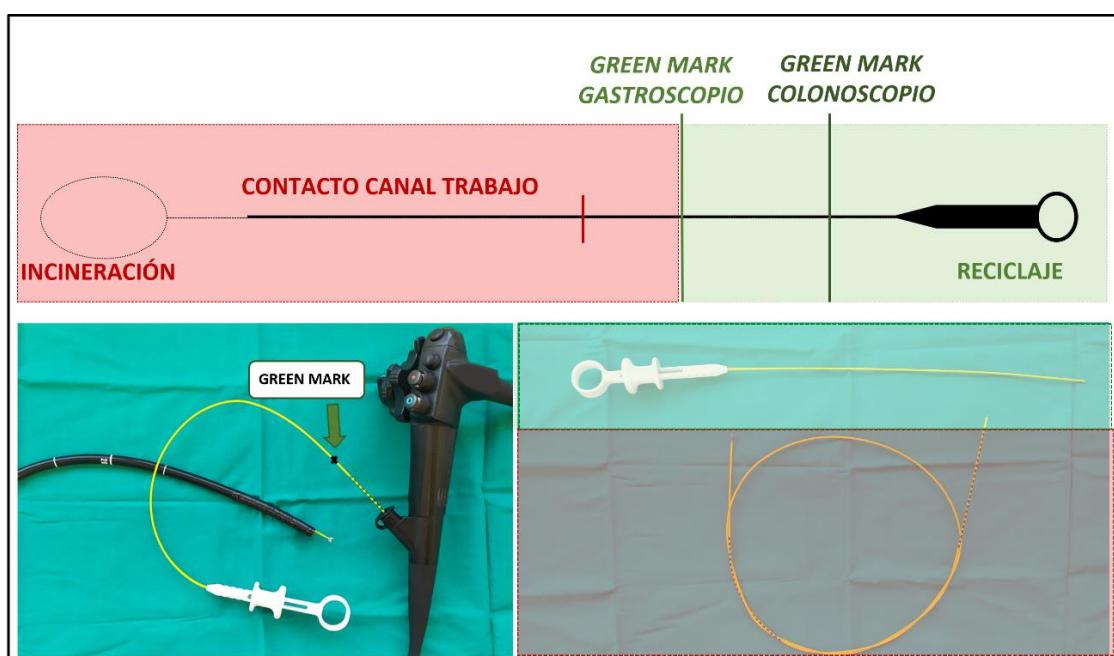


Figura 4.23: Esquema de la hipótesis de intervención sostenible *green mark*, creando una marca a partir de la cual el accesorio no está contaminado y puede evitarse su incineración.

Determinamos la media, mediana y el intervalo de confianza de la longitud desde la punta del accesorio hasta el área que queda en contacto en mayor profundidad con el canal de trabajo, que marcamos durante 30 exploraciones consecutivas. Establecimos 5 cm de seguridad desde el contacto con el canal de trabajo, porque, aunque teóricamente esta área no está contaminada, todavía estaría en contacto con las manos del endoscopista y del asistente, con múltiples pasadas. Para reducir el riesgo potencial de contaminación, la *green mark* la establecimos 5 cm por encima del valor superior en el intervalo de confianza de las 30 medidas Figura 4.24).

4. METODOLOGÍA



Figura 4.24: Intervención de sostenibilidad “green mark” sobre la pinza (A), antes y después de su fragmentación

En estos procedimientos pusimos a prueba la viabilidad de fragmentar el accesorio tras el procedimiento, con herramientas habituales en una unidad de endoscopias, separando las partes del accesorio que entran en contacto con el canal de trabajo y que se

desecharán mediante incineración a alta temperatura, y otras que no han sido contaminadas y que podríamos desechar de otro modo (vertederos, reciclaje, etc.).

4.2.2 Estudio prospectivo de sostenibilidad

Se realizó un estudio prospectivo en la Unidad de Endoscopia Digestiva del Hospital Universitario y Politécnico La Fe, para evaluar la viabilidad de nuestra intervención de sostenibilidad en la práctica clínica. El objetivo fue conocer el impacto medioambiental del fungible empleado en una Unidad de Endoscopia durante una semana, así como el “ahorro” de emisiones derivadas de la intervención sostenible. Para ello cuantificamos el total de material fungible empleado en nuestra Unidad durante una semana de trabajo, en términos de asas, pinzas y hemoclips. Dado que es el material que utilizamos habitualmente en nuestra unidad, realizamos esta intervención sobre las pinzas de biopsia (A), asas de polipectomía (A) y hemoclips (B). Una vez terminada la exploración, procedimos a la desinfección manual y fragmentación por el área no contaminada (*green mark*), de modo que la parte en contacto con el canal de trabajo se depositó en contenedores especiales para su incineración a alta temperatura, y las partes no contaminadas se recuperaron para análisis estructural.

Posteriormente, llevamos a cabo un análisis de ciclo de vida derivado de nuestra intervención sostenible, y comparamos las emisiones habituales que derivarían de la práctica clínica habitual (incineración completa de los accesorios), con las emisiones tras la intervención sostenible. Calculamos las diferencias de huella de carbono en unidades de kgCO₂-eq antes y después de la intervención de sostenibilidad y estimamos la eficacia medioambiental de esta medida. Finalmente, se extrapolaron los resultados al consumo anual de materiales a un año de trabajo para ofrecer resultados reales de la intervención de sostenibilidad y los beneficios medioambientales que podría conllevar.

Al hacer una fragmentación y separación de las partes contaminadas para incineración, en vez del accesorio en su totalidad, redujimos en gran cantidad el peso del material (el mango y parte del cuerpo) que se envía a incineración a alta temperatura. Si bien, los cálculos de eficacia medioambiental de estas medidas fueron realizados únicamente desde el punto de vista teórico, ya que, según la legislación y normativa europea, los dispositivos de uso médico que contactan con tejidos humanos que son de un solo uso e incinerarse a alta temperatura. En otros países, la legislación no obliga a este

4. METODOLOGÍA

tratamiento de residuos. Nuestra propuesta tiene como objetivo sentar las bases de otros métodos industriales de diseño de dispositivos parcialmente reciclables que permitan mejorar el impacto medioambiental de nuestras unidades de endoscopia.

4.3. Evaluación ambiental de duodenoscopios reutilizables y desechables

La segunda parte de este trabajo ha ido dedicada a analizar la composición de duodenoscopios desechables (DD) y reutilizables (DR), para comparar la huella de carbono de cada uno de ellos y en base a los resultados hacer estimaciones de los diferentes escenarios de sostenibilidad al implementar los DD en la práctica clínica

4.3.1. Análisis de la composición de duodenoscopios

4.3.1.1. Selección del instrumental

Los duodenoscopios son endoscopios específicamente diseñados para el tracto digestivo superior, con visión lateral para abordar la papila mayor en la segunda porción duodenal, permitiendo su acceso mediante instrumental específico, y así diagnosticar y tratar afecciones de la vía biliar y el páncreas. Por las características de su extremo distal, en especial el elevador de los accesorios que pasan a través del canal de trabajo, también conocido como “uña”, presenta unos problemas especiales de desinfección y reprocesamiento. Se han creado protocolos específicos de desinfección de estos endoscopios para evitar el riesgo de contaminación cruzada de patógenos y así reducir la posibilidad de infección yatrogénica. Frente a los duodenoscopios reutilizables (DR) tradicionales, han irrumpido en el mercado recientemente los duodenoscopios desechables (DD) de un solo uso. Presentan una teórica ausencia de riesgo de infección por contaminación cruzada, al ser de uso único, pero su adopción universal puede provocar importantes riesgos medioambientales. Esto es debido a que, se incrementa en gran medida la cadena de producción necesaria y la necesidad del transporte de mercancías hasta los centros hospitalarios. Además, constituye un aumento considerable del material enviado a incineración, ya que, tras el procedimiento, se consideran en su totalidad como RBM.

Seleccionamos para análisis un DR recientemente descartado para la práctica clínica tras más de 10 años de uso, así como dos DD de diferentes casas comerciales (A y B), utilizados en pacientes inmunodeprimidos por trasplante hepático, que fueron

reprocesados para su análisis estructural (Figura 4.25).

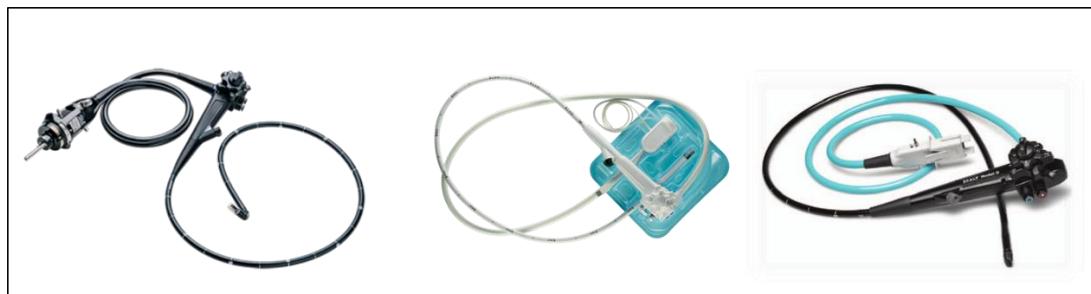


Figura 4.25: De izquierda a derecha, el DR y los DD de la casa comercial A y B.

4.3.1.2. Fragmentación, inspección visual y pesado

Fragmentamos los duodenoscopios y los dividimos en sus diferentes partes, catalogando en función de la localización y el tipo de material aproximado (plásticos o metales). Categorizamos las diferentes partes y las pesamos antes de llevar a cabo el análisis de la composición (Figura 4.26).



Figura 4.26: Endoscopio desechable durante su manipulación, fragmentación y categorización de sus diferentes partes.

4.3.1.3. Caracterización de los duodenoscopios

El análisis de la composición se realizó en el laboratorio del Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular (CBIT) de la Universidad Politécnica de Valencia. De igual modo que

4. METODOLOGÍA

hicimos con los accesorios de endoscopia, con la ayuda de este grupo de investigación, realizamos la caracterización de las propiedades de los componentes, así como su análisis.

La metodología utilizada para el análisis fue similar a la del apartado 4.1.1. de este capítulo. Después de fragmentar los duodenoscopios y catalogar el material, seleccionamos muestras de las diferentes partes para realizar la caracterización de los materiales de fabricación. El material plástico se analizó por métodos térmicos (DSC y TGA) que permitieron calcular las temperaturas de fusión, de transición vítrea y de descomposición y por espectroscopía infrarroja (FTIR) que permite identificar polímeros sintéticos basándose en sus espectros de vibración molecular característicos. Para analizar los componentes metálicos se utilizó un microscopio electrónico FESEM acoplado a un detector EDX que permite estimar el tipo de aleación metálica más probable.

4.3.2. Análisis de ciclo de vida de duodenoscopios desechables y reutilizables

Tras el análisis de la composición, con los resultados sobre el peso y el material más probablemente empleado en la fabricación, se realizó un estudio del impacto medioambiental de todas las etapas del ciclo de vida de los duodenoscopios, en un modelo *cradle-to-grave* en términos de huella de carbono en kgCO₂-eq (análisis de ciclo de vida).

Nuestra metodología abarca un análisis exhaustivo que considera todo el ciclo de vida de los duodenoscopios, desde la extracción de recursos y el consumo de energía de la fabricación, hasta el transporte dentro del proceso de producción, la entrega en el hospital y la disposición final.

En esta etapa evaluamos la extracción de materias primas, el transporte y la gestión de residuos, y, además, para el caso de los DR estimamos también las emisiones derivadas de la desinfección y reprocesamiento para así cuantificar todos los impactos medioambientales de este tipo de dispositivo.

4.3.2.1. Análisis de la producción y transporte de duodenoscopios

Al igual que con los accesorios endoscópicos, realizamos los análisis de inventario correspondientes, creando los flujos de entrada y salida, productos y sistemas para la fabricación (Figura 4.27) y transporte (Figura 4.28) del DR, DD (A) y DD (B).

Determinamos como indicador principal el GWP en términos de la huella de carbono (medida en kgCO₂-eq), durante un período específico de 100 años y el resto de las

emisiones de GEI se convirtieron en kgCO₂-eq.

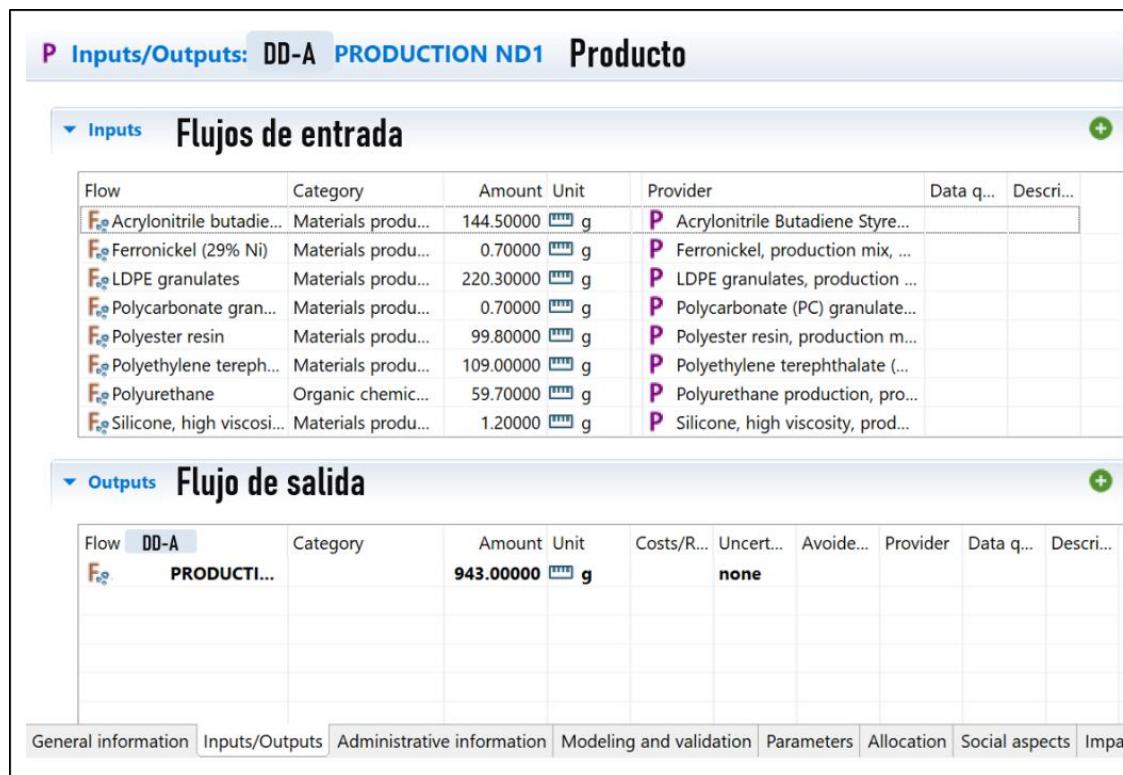


Figura 4.27: Creación del producto de la fabricación del DD-A dentro de su análisis de ciclo de vida.

La huella de carbono se estimó de igual modo que para los accesorios de endoscopia, utilizando el software openLCA V.2.0.3 (*GreenDelta GmbH, Alemania*). Las bases de datos de ACV utilizadas para el análisis del inventario del ciclo de vida fueron *EF Secondary Data sets V. EF 2.0*. El método de evaluación de impacto utilizado fue *EF (mid-point indicator)* (véase 4.1.2.3.).

Un análisis de laboratorio meticuloso proporcionó información precisa sobre el peso y la composición de los duodenoscopios, lo que ayudó a determinar los componentes materiales empleados por los fabricantes en la producción. Esto facilitó el cálculo de las emisiones de GEI asociadas con la producción y el transporte de los DD y los DR, lo que nos permitió identificar el endoscopio más sostenible.

Para estimar las emisiones de carbono provenientes del transporte, se realizaron varias suposiciones, considerando diferentes lugares de fabricación y rutas de envío

4. METODOLOGÍA

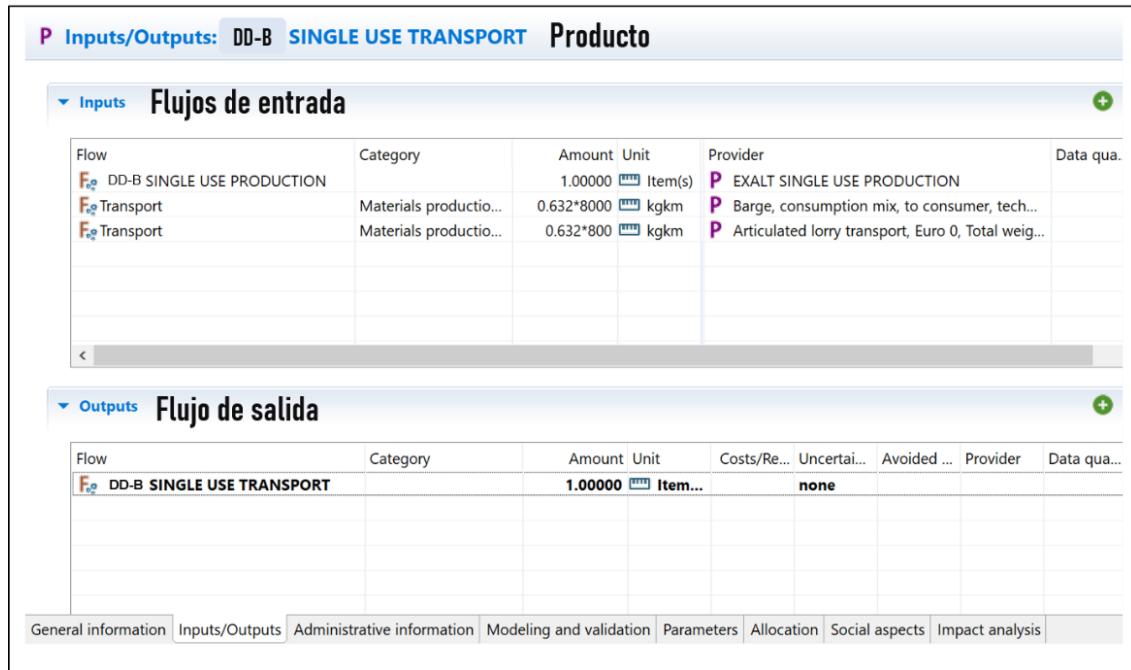


Figura 4.28: Creación del producto del transporte y fabricación combinados del DD-B dentro de su análisis de ciclo de vida.

tradicionalmente frecuentes. Se calcularon las emisiones resultantes del envío a través de barco de carga para rutas transoceánicas y camiones diésel para rutas continentales. Se asumió la ruta continental desde el lugar de fabricación hasta el puerto internacional más cercano, y la ruta transoceánica desde dicho puerto internacional con el puerto de Valencia. Es importante señalar que las etapas de fabricación y ensamblaje (inyección, extrusión y laminación), que constituyen aproximadamente el 15% del impacto ambiental total, no se incluyeron en los cálculos debido a limitaciones en las bases de datos disponibles [142].

Conociendo el lugar de fabricación, estimamos de forma aproximada las rutas internacionales más habituales, tanto por tierra como por mar. Concretamente, calculamos las emisiones derivadas del transporte de los duodenoscopios desde las ubicaciones de los fabricantes de DR y de DD-A y DD-B hasta el Hospital Universitario y Politécnico La Fe [140] (Tabla 4.2). No tuvimos en cuenta otro tipo de transportes intermedios.

Tabla 4.2: Rutas comerciales aproximadas desde los lugares de fabricación de duodenoscopios

Fabricante	Origen	Ruta terrestre (km en camión diésel)	Ruta marítima (km en barco de carga)
DR	Ho Chi Minh, Vietnam	-	14000
DD-A	Xiangyu, China	-	18000
DD-B	San José, Costa Rica	800	8000

Posteriormente al diseño de todos los productos (fabricación y transporte de todos los duodenoscopios), los aunamos en sistemas de productos para estudiar las entradas y salidas globales, los co-productos resultantes y evaluar los impactos medioambientales. Generamos además diagramas de flujo de los diferentes sistemas (Figura 4.29)

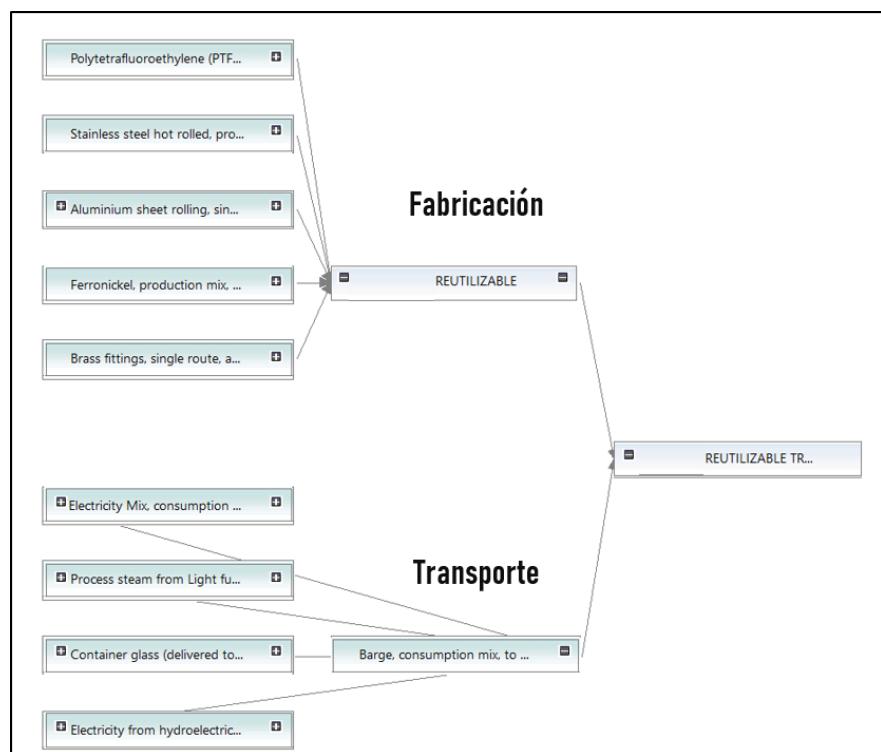


Figura 4.29: Diagrama de flujo del sistema completo de análisis de ciclo de vida de la producción y el transporte del duodenoscopio reutilizable.

4. METODOLOGÍA

4.3.2.2. Análisis del reprocesamiento de DR y gestión de residuos de DD

La limpieza y desinfección de los DR es crucial para mantener la seguridad frente a infecciones y evitar la contaminación cruzada de microorganismos, que en ocasiones colonizan estos dispositivos. Como es evidente, este nivel de reprocesamiento requiere grandes cantidades de agua, electricidad, calor, desinfectantes y detergentes. Los costes ambientales de reprocesamiento y desinfección de los RD se incluyeron en el ACV global. Nuestra estimación por ciclo de reprocesamiento fue de 91 litros de agua, 0,33 kilovatios-hora (kWh) de consumo energético y diversos detergentes [33] (Figura 4.30). Evaluamos el impacto ambiental de los productos químicos desinfectantes para el reprocesamiento automatizado de la máquina de lavado de endoscopios EndoThermo (*ETD; Olympus, Hamburgo, Alemania*), que son aproximadamente 0,12 g de alcoholes grasos etoxilados, 0,12 g de cumenosulfonato de sodio, 0,5 g de ácido acético, 0,5 g de peróxido de hidrógeno al 100%, y 1 g de hidróxido de sodio [145].

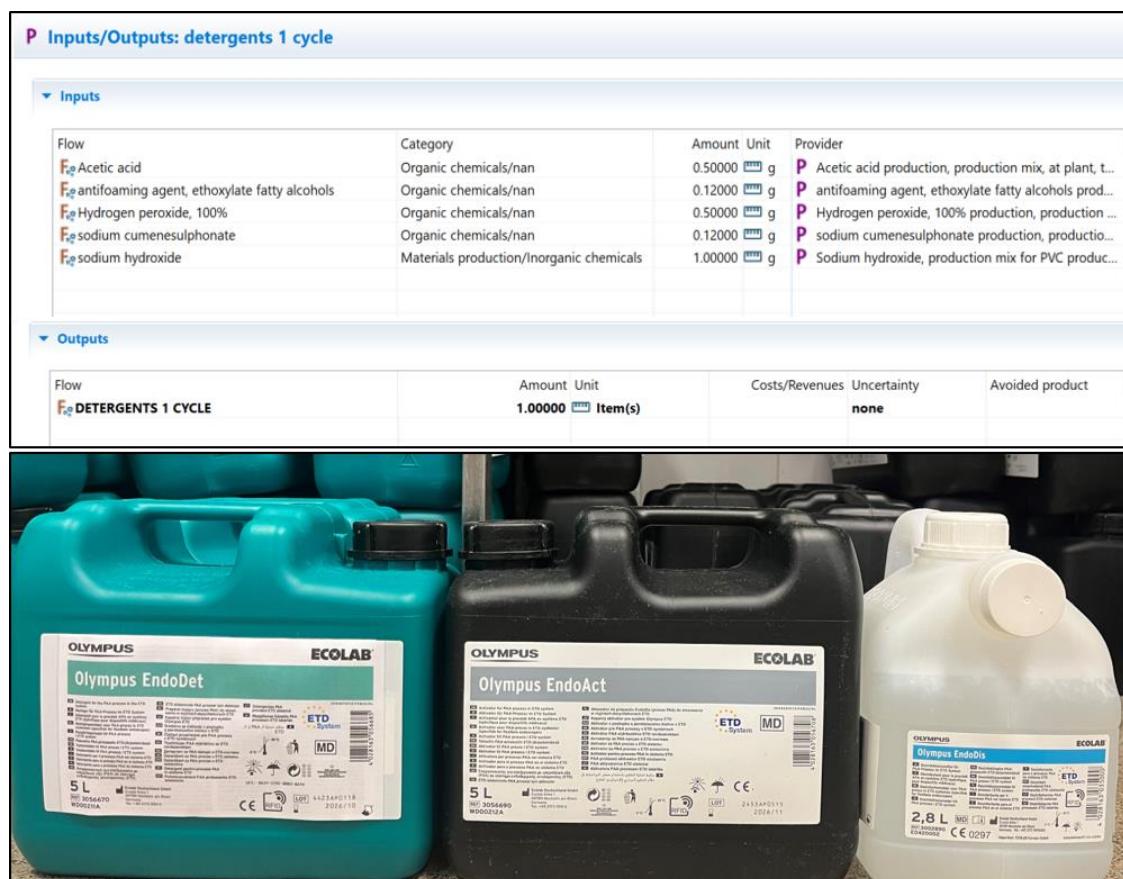


Figura 4.30: Creación de producto en el ACV en relación a agentes detergentes y desinfectantes utilizados durante el reprocesamiento de endoscopios reutilizables.

Estos productos reducen de manera efectiva los residuos orgánicos y los restos de proteínas con un potenciador de limpieza especial, son ampliamente eficaces contra patógenos relevantes en endoscopias y cumple con los estándares europeos de reprocesamiento actualizado de endoscopios. Presentan tanto actividad bactericida, como fungicida, micobactericida, virucida y esporicida. El consumo de agua y electricidad se calculó utilizando factores de conversión de emisiones de GEI [146], resultando en emisiones para electricidad (0,19 kg CO₂-eq/kWh) y consumo de agua (0,149 kg CO₂-eq/m³).

Al igual que con los accesorios de uso endoscópico, el tratamiento de residuos de DD es considerado RBM, por lo que requiere su eliminación mediante incineración a alta temperatura. Las emisiones al final de la vida útil se aproximaron sobre la información más reciente disponible en la literatura sobre los flujos de residuos [16, 74, 143]. Se estimó que la incineración de RBM generales era de 1,074 kgCO₂-eq/kg para materiales no plásticos [18]. Para los materiales plásticos destinados a la incineración, existen varias estimaciones que oscilan entre 3 y 6 kgCO₂-eq/kg [143, 144]. Se asumió el peor escenario medioambiental (*véase 4.1*). No tuvimos en cuenta las emisiones derivadas de la disposición final del DR, dado que los endoscopios descartados para práctica clínica se utilizan para docencia e investigación.

Al igual que realizamos con los accesorios endoscópicos, una vez los flujos, productos y sistemas del análisis de ciclo de vida estuvieron determinados, evaluamos los impactos medioambientales derivados del uso de DR y DD, mediante el método de evaluación de impacto *Environmental Footprint (Mid-point indicator)* (Figuras 4.31 y 4.32).

4. METODOLOGÍA

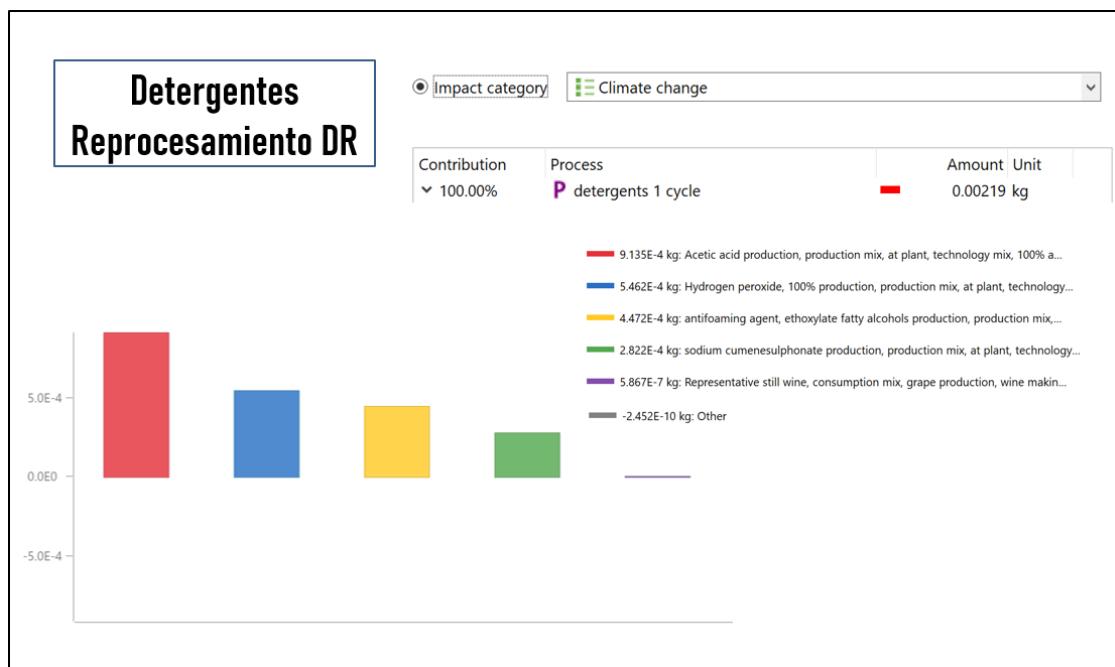


Figura 4.31: Huella de carbono en kg CO₂-eq relativa a los detergentes utilizados en el reprocesamiento del ACV de los duodenoscopios reutilizables, estratificada por el impacto ecológico derivado de cada sustancia.



Figura 4.32: Acidificación del medio ambiente, en moles de ion hidrógeno equivalentes (mol H⁺ eq), resultante de la fabricación de un DD-A, estratificada por el impacto ecológico derivado de cada material.

4.4. Comparación de escenarios de sostenibilidad con el uso universal de duodenoscopios reutilizables y desechables

El riesgo real de infecciones asociadas directamente con el uso de endoscopios se estima que sea de 1 infección por cada 20.000-1,8 millones de procedimientos [92], con riesgo general de muerte de aproximadamente 1 en 150.000 CPREs [93], considerablemente menor que la mortalidad por todas las causas tras CPRE, que es de 1 entre 500 [94]. Estos brotes infecciosos han motivado el desarrollo de los DD. Sin embargo, antes de su introducción en el mercado no se ha evaluado el impacto medioambiental que conllevaría el uso generalizado de estos dispositivos.

Al realizar un estudio de la composición e impacto medioambiental de la producción y transporte de los DR y DD, así como la incineración de los DD y el reprocesamiento de DR, extrapolamos los resultados a una unidad de endoscopia convencional.

Comparamos el impacto medioambiental derivado de la estrategia de sostenibilidad reutilizable y la desecharable. Para ello tuvimos en cuenta un hospital estándar en el que se realizan 5 procedimientos con duodenoscopio (CPRE) por semana, y asumimos una vida útil del DR de al menos 8 años, lo que globalmente equivale aproximadamente a 1600 procedimientos.

Calculamos las emisiones derivadas de la producción y transporte de 1600 DD respecto a un DR, así como la incineración a alta temperatura de los 1600 DD respecto a 1600 reprocesamientos del DR (Figura 4.33).

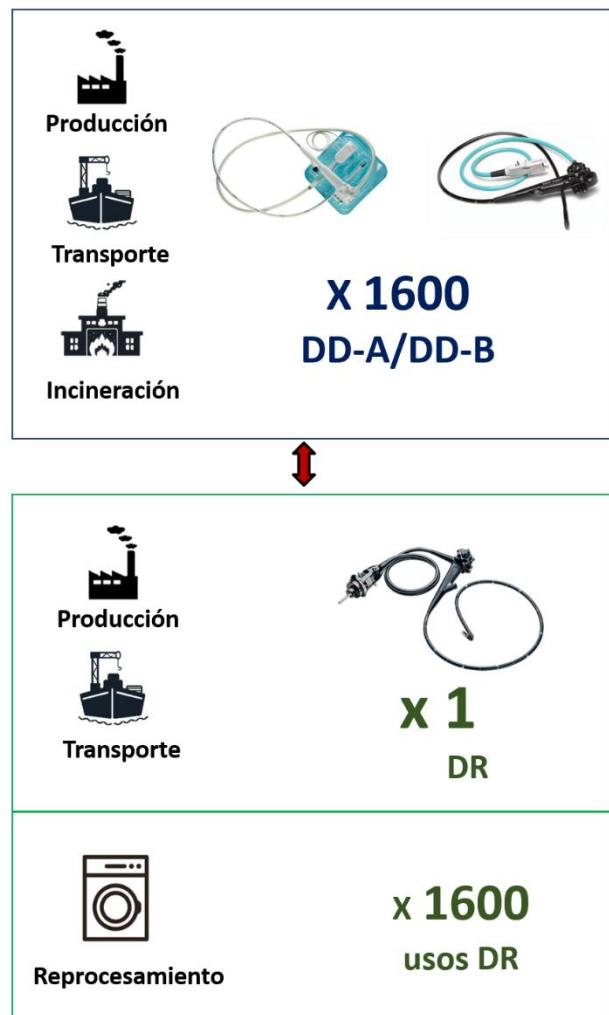


Figura 4.33: Comparación del impacto medioambiental de la adopción global de duodenoscopios de un solo uso respecto de la estrategia convencional con duodenoscopios reutilizables.

5. RESULTADOS

5. RESULTADOS

5.1. Evaluación ambiental de accesorios de endoscopia digestiva

5.1.1. Análisis de la composición de accesorios fungibles de endoscopia digestiva

El análisis de la composición de los accesorios de diferentes casas comerciales mostró importantes diferencias en peso y en los materiales empleados en la fabricación por parte de las diferentes casas comerciales. Para el análisis de la composición se seleccionaron cuatro casas comerciales (A, B, C, D), y de cada una de ellas, tres pinzas de biopsia (A, B y C), tres asas de polipectomía (A, B y D) y dos hemoclips (A y B). En el apartado 4.1.1.2. se detalla la fragmentación realizada a los dispositivos. La Tabla 5.1 resume la distribución de peso medio de los accesorios endoscópicos evaluados, así como el peso del material utilizado en el embalaje del instrumental.

Tabla 5.1: Peso medio del dispositivo y del embalaje de pinzas, asas y hemoclips.

	Tipo de dispositivo*		
Peso, g	Pinzas	Asas	Hemoclips
Total	57,08 (64,46 - 46,39)	57,05 (64,58 - 52,92)	71,29 (85,63 - 56,93)
Dispositivo	45,82 (54,60 - 33,75)	42,96 (47,46 - 40,28)	54,60 (65,60 - 43,58)
Embalaje	11,31 (12,63 - 9,86)	14,10 (17,12 - 11,8)	16,69 (20,03 - 13,35)

* Los datos mostrados entre paréntesis corresponden al intervalo de valores encontrados para cada fungible.

Como puede observarse, el peso del embalaje resulta muy significativo. En efecto, pese a que las asas y las pinzas tienen un peso total similar, en torno a 57 g, el peso del embalaje de las asas es superior, lo que denota que el embalaje de las asas aún podría optimizarse. Los hemoclips fueron globalmente más pesados que las asas y las pinzas.

Todos los accesorios se suministran debidamente empaquetados de forma individual antes de su uso. Si bien el embalaje puede reciclarse, el resto del accesorio endoscópico está en contacto con los tejidos del paciente y debe considerarse RBM y, por tanto, es sometido a incineración. Sin embargo, parte del cuerpo y el mango del dispositivo nunca están en contacto con el paciente ni el canal de trabajo, por esta razón estructuramos

5. RESULTADOS

el análisis de todos los accesorios en diferentes partes: embalaje, mango, y cuerpo con extremo distal. La Figura 5.1 muestra el porcentaje de masa de cada una de estas tres partes para cada dispositivo. Cabe destacar que el embalaje representó más del 20 % del peso en la mayoría de los casos. Además, el porcentaje de embalaje más mango fue superior al 50 % de la masa en prácticamente todos los casos, salvo en pinza A y hemoclip B. Esto es relevante de cara a nuestra propuesta de sostenibilidad, *green mark*, que pretende reciclar el embalaje y evitar la incineración del mango y parte del cuerpo del dispositivo [147].

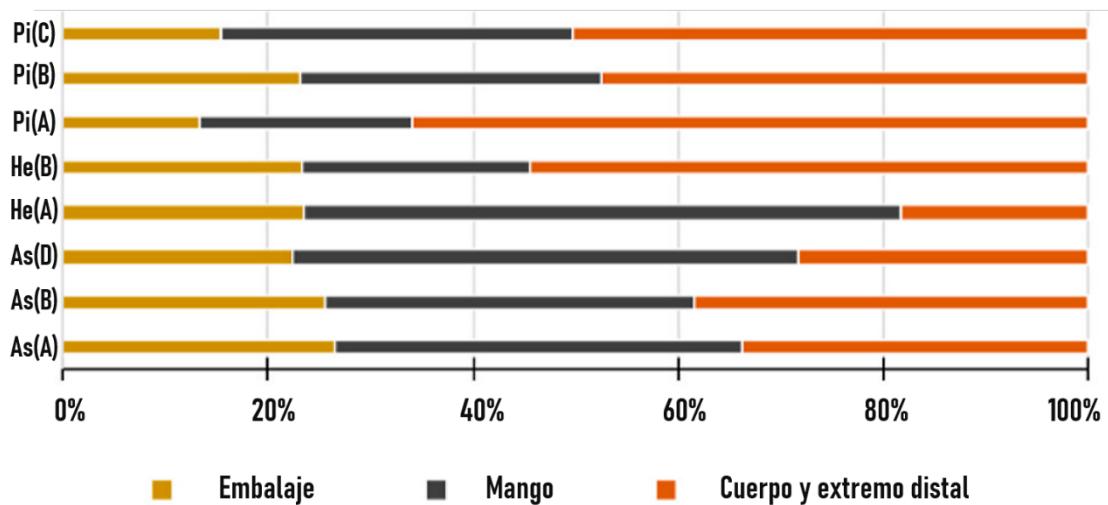


Figura 5.1: Peso relativo del embalaje, mango y cuerpo distal de cada uno de los accesorios de endoscopia. (Pi, pinza; He, hemoclip; As, asa) [139].

Para el análisis de los materiales plásticos se utilizaron las técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA) y espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y para el análisis de los componentes metálicos la microscopía electrónica de barrido de emisión de campo con detector de detector de energía dispersiva de Rayos X (FESEM/EDX) (véase 4.1.1).

Los análisis de DSC y TGA se utilizaron para determinar los parámetros térmicos del material analizado que nos permitan identificar su composición. En particular, las temperaturas de fusión (T_m), temperatura de transición vítrea (T_g) y temperatura de descomposición (T_d) de cada muestra, ya que estas propiedades son específicas de cada polímero. También proporcionan la información necesaria para identificar si la muestra es pura o híbrida (presencia de aditivos, varios polímeros, mezclas o un compuesto).

La espectroscopía FTIR se utilizó para determinar el perfil químico de cada muestra, proporcionando información precisa sobre la composición de cada muestra polimérica. Del estudio de las bandas de absorción podemos deducir la presencia de grupos funcionales característicos de los distintos polímeros.

Como ejemplo, en la Figura 5.2, se muestran los resultados de la caracterización de la muestra del mango del hemoclip A.

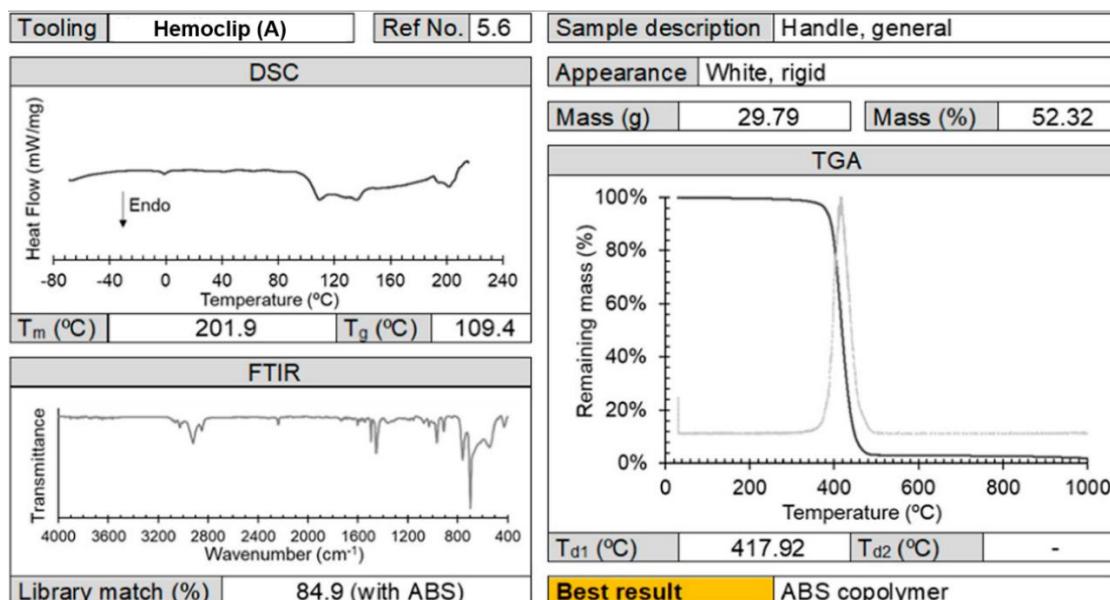


Figura 5.2: Análisis instrumental del mango del hemoclip A mediante las técnicas de caracterización térmica DSC y TGA, así como el perfil químico FTIR.

En la parte superior izquierda se muestra el perfil de DSC de una muestra de hemoclip. Como se puede apreciar, a medida que aumenta la temperatura se observa un primer descenso en la línea base que es característico de una transición vítrea, para la que se calculó T_g de 109.4°C. A temperaturas superiores se observó un pequeño pico endotérmico, característico de un compuesto que no tiene un proceso claro de fusión, ligeramente por encima de los 200 °C.

En la parte derecha de la Figura 5.2, se expone el termograma del análisis de TGA de la misma muestra junto con la primera derivada de la señal. Se observa la disminución abrupta en la masa de la muestra característica de la descomposición del material, junto con el pico de la derivada de la señal, que permitió calcular la T_d del material en 417,92 °C. La comparación de estos datos con los existentes en las tablas de referencia de los distintos polímeros sugiere que la muestra es ABS, ya que los datos coinciden con los que aparecen en la bibliografía para este material [148, 149].

5. RESULTADOS

El perfil químico FTIR de la muestra (abajo a la izquierda) confirmó que el material era ABS [150-152]. Aparecen los picos típicos de ABS a 698, 758, 910, 965, 1028, 1452, 1493, 1637 y 3301 cm⁻¹.

Por otro lado, los análisis de FESEM/EDX para componentes metálicos proporcionan información sobre la composición elemental de la muestra, dando un perfil atómico que, cuando se analiza, proporciona información para determinar la naturaleza del material no polimérico. En la Figura 5.3 se observa un ejemplo para la muestra del cuerpo metálico de las pinzas A. En el espectro de EDX aparecen como picos más abundantes Fe y Cr y el equipo proporciona una composición elemental para el material analizado de Fe 64.4/Cr 17.2/Ni 7.0, probablemente atribuible a acero inoxidable tipo AISI-304 [153, 154].

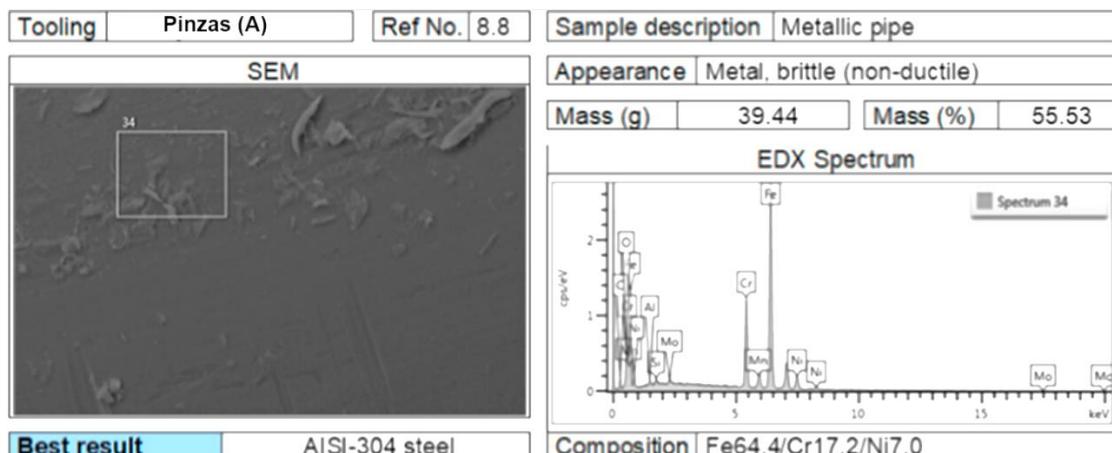


Figura 5.3: Análisis instrumental del cuerpo metálico de las pinzas de biopsia A mediante la técnica de caracterización combinada FESEM/EDX.

Una vez analizadas todas las muestras podemos afirmar que los principales componentes de los accesorios de endoscopia eran:

- 1) Polímeros plásticos como:
 - a) Polietileno de baja densidad (LDPE)
 - b) Polietileno de alta densidad (HDPE)
 - c) Copolímero de acrilonitrilo, butadieno y estireno (ABS)
 - d) Polipropileno (PP)
 - e) En pequeñas cantidades y para componentes muy específicos, se identificaron otros materiales como etilvinilacetato (EVA), policarbonato (PC) y polidimetilsiloxano (PDMS).
- 2) Metales como el acero inoxidable (SS, del inglés *stainless steel*).

La composición por peso de las diferentes asas de polipectomía, pinzas de biopsia y hemoclips se muestran en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6, respectivamente.

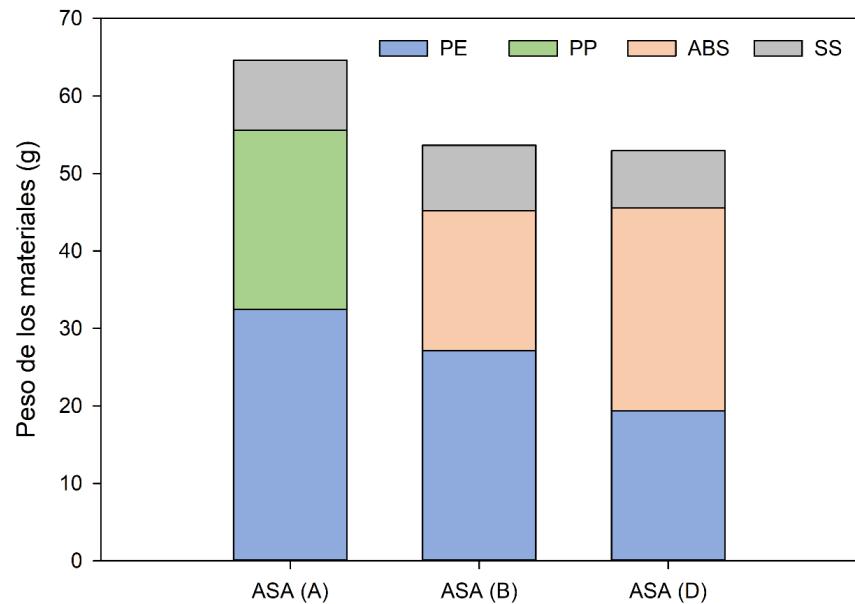


Figura 5.4: Composición de los materiales de las asas de polipectomía por casas comerciales incluyendo el embalaje. (PE, polietileno; PP, polipropileno; ABS, copolímero de acrilonitrilo butadieno estireno; SS, acero inoxidable).

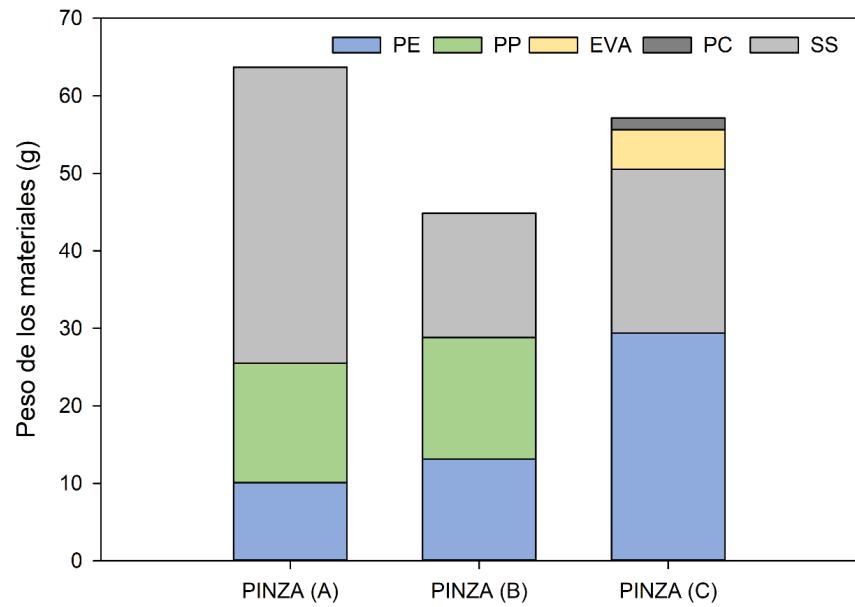


Figura 5.5: Composición de los materiales de las pinzas de biopsia por casas comerciales incluyendo el embalaje (EVA, etilvinilacetato; PC, policarbonato).

5. RESULTADOS

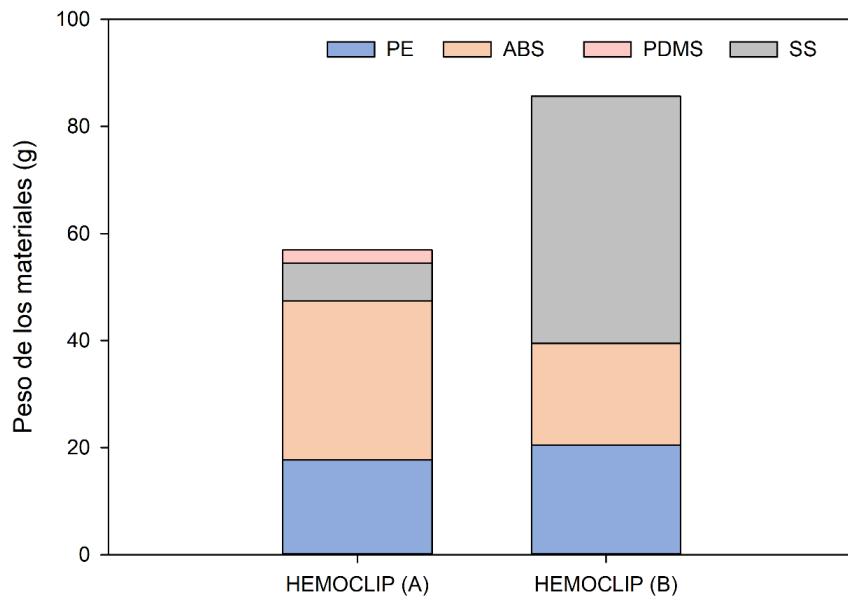


Figura 5.6: Composición de los materiales de los hemoclips por casas comerciales, incluyendo el embalaje. (PDMS, polidimetilsiloxano).

La composición de los accesorios varía significativamente entre los distintos fabricantes (A-D). Para el caso de las asas de polipectomía analizadas (A, B, D), la diferencia más relevante fue que el mango del asa A está compuesto de PP mientras que las otras dos están compuestas por ABS. Además, la cantidad total de contenido en polietilenos varió (A>B>D), siendo un 30% menor en D que A. Sin embargo, la cantidad de acero inoxidable (SS) fue similar en las tres. En el caso de las pinzas (A, B, C), la diferencia más notable fue que el mango de la pinza C está compuesto por polietilenos, mientras que los mangos de las pinzas A y B están compuestas por PP. En cuanto al embalaje, en todos los accesorios se componen de LDPE y HDPE, salvo el caso de el embalaje de la pinza C, en cuya composición encontramos EVA. La pinza A tuvo una cantidad sustancialmente mayor de acero que las pinzas B y C y se convierte en el material más predominante en este accesorio. Descontando el embalaje, la pinza A pesó 54,6 g, un 62 % más que la pinza más ligera, mientras que, el hemoclip B pesó 65,6 g, un 50 % más que el hemoclip A. Además, el hemoclip B presentó seis veces más cantidad de acero. Estas diferencias conllevan importantes diferencias en el impacto ambiental. Al necesitar más extracción de materias primas, energía y transporte para una misma función clínica. Además, el embalaje más pesado fue de 20,03 g respecto de los 9,86 g del más ligero, para instrumentos de similar longitud y peso, lo que supone incrementos del más del 200% y

denota que el embalaje puede optimizarse para conseguir disminuir el impacto medioambiental.

Las diferencias observadas pueden ser significativas ya que el ABS es un material un 55 % más contaminante (3,22 kgCO₂-eq por kg de producción) que el PP y los polietilenos (2,07-2,3 kgCO₂-eq por kg de producción), realizando una función similar.

Para poder comparar los materiales, en términos de residuos con potencial de calentamiento global (GWP), se clasificaron en dos grupos: residuos de alto GWP (principalmente LDPE, HDPE, ABS y PP) y residuos de bajo GWP (SS). La Figura 5.7 muestra la proporción de los dos grupos en todos los accesorios seleccionados en este trabajo. La proporción en peso de acero inoxidable de las asas de diferentes fabricantes fue similar (14-15%), pero se encontraron diferencias significativas entre pinzas de biopsia (35-59%) y hemoclips (13-53%).

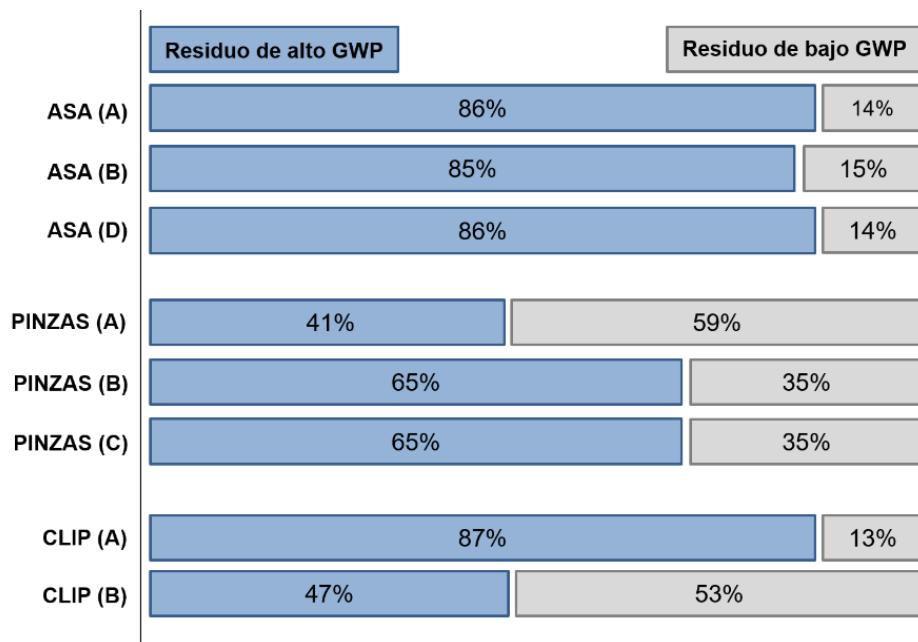


Figura 5.7: Materiales de los accesorios de las distintas casas comerciales según el porcentaje de residuos de alto potencial de calentamiento global (GWP).

5.1.2. Análisis de ciclo de vida de accesorios fungibles en endoscopia digestiva

El estudio del impacto medioambiental de todas las etapas del ciclo de vida de los accesorios fungibles se realizó tal y como se indica en 4.1.2. Los resultados del ACV de

5. RESULTADOS

todos los accesorios de las diferentes casas comerciales mostraron que la huella de carbono media fue significativamente mayor para los clips hemostáticos (0,49 kgCO₂-eq, rango 0,41-0,57) que para las asas de polipectomía (0,41 kgCO₂-eq, rango 0,38-0,44) y pinzas de biopsia (0,41 kgCO₂-eq, rango 0,31-0,47) ($p<0,001$). Los resultados obtenidos en el ACV de todos los instrumentos ordenados por producción, transporte e incineración se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Emisiones medias en términos de huella de carbono expresada en kgCO₂-eq de los accesorios de todas las casas comerciales.

Etapa	Emisiones*, kg CO ₂ -eq		
	Pinzas	Asas	Clips
Producción	0,25 (0,075)	0,18 (0,005)	0,3 (0,169)
Transporte	0,02 (0)	0,02 (0,005)	0,015 (0,007)
Incineración	0,15 (0,038)	0,22 (0,021)	0,17 (0,049)
Total	0,41 (0,089)	0,41 (0,030)	0,49 (0,113)

* Los valores entre paréntesis corresponde a la desviación estándar de las muestras estudiadas.

Se realizó un estudio estadístico de los resultados mediante la prueba de Análisis de Varianza combinada con Comparaciones múltiples. Se encontraron diferencias significativas ($p<0,001$) en la huella de carbono entre los diferentes fabricantes (A, B, C, D) para pinzas de biopsia (0,31-0,46 kgCO₂-eq) y para clips hemostáticos (0,41-0,57 kgCO₂-eq), pero no entre las asas de polipectomía (0,38-0,44 kgCO₂-eq) ($p=0,108$) (Figuras 5.8, 5.9 y 5.10, respectivamente). Estas diferencias se debieron principalmente a las emisiones derivadas de la producción de las pinzas de biopsia (0,17-0,32 kgCO₂-eq) y clips hemostáticos (0,18-0,42 kgCO₂-eq) ($p<0,001$). La incineración fue la principal fuente de las emisiones de carbono en accesorios cuya composición era principalmente plásticos (residuos de alto GWP), como las asas de polipectomía y el clip A (0,20-0,24 kgCO₂-eq).

Las diferencias de huella de carbono del ciclo de vida de los accesorios son más notables en las pinzas y los clips. Concretamente, la pinza A presentó una huella de carbono de aproximadamente un 48 % más que la pinza B, mientras que, entre los hemoclips, el de la casa comercial B contaminó un 39 % más. Si bien, si tenemos en cuenta únicamente la fase de fabricación, las emisiones derivadas del hemoclip B son un 133 % más que las del

hemoclip A. En cambio, las asas de polipectomía presentaron emisiones de carbono similares entre casas comerciales (0,38-0,44 kgCO₂-eq).

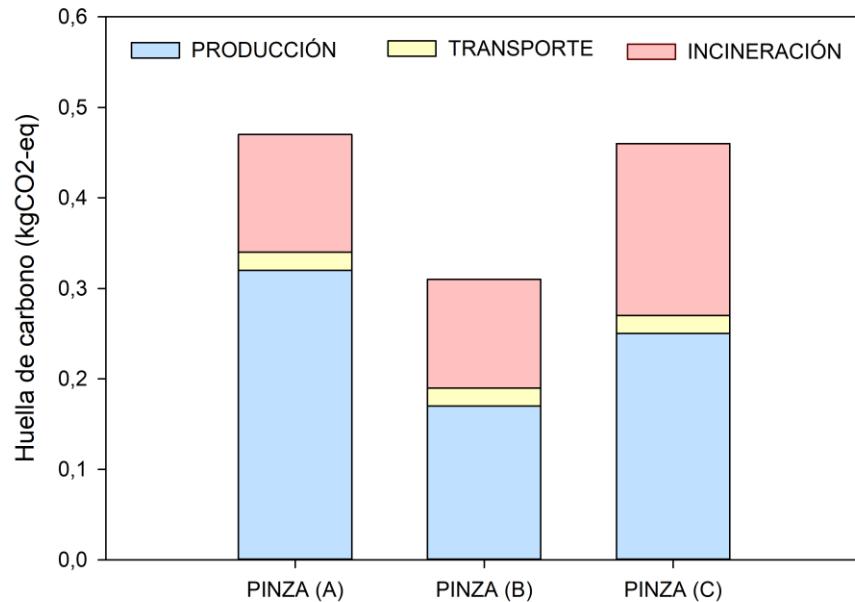


Figura 5.8: Emisiones de carbono en cada una de las etapas del ciclo de vida de las pinzas de biopsia de las distintas casas comerciales (A, B, C).

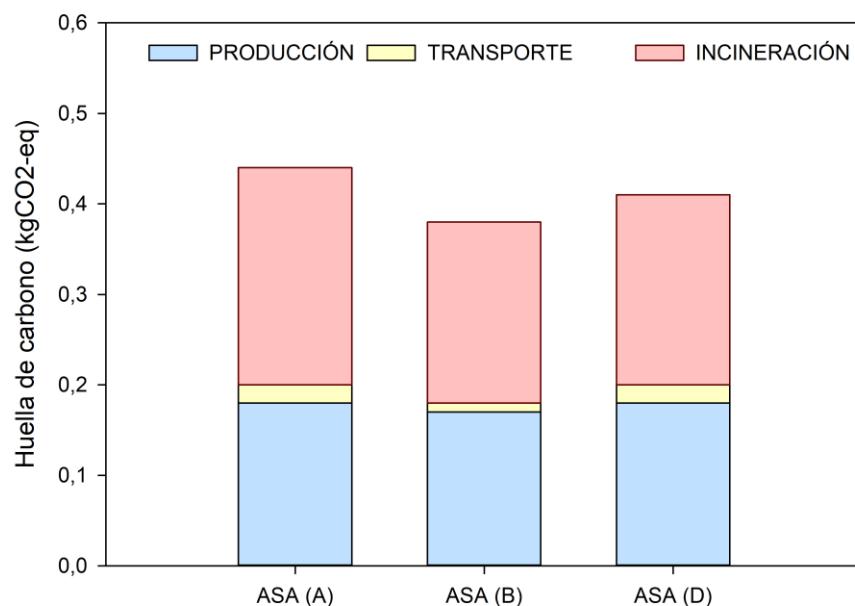


Figura 5.9: Emisiones de carbono en cada una de las etapas del ciclo de vida de las asas de polipectomía de las distintas casas comerciales (A, B, D).

5. RESULTADOS

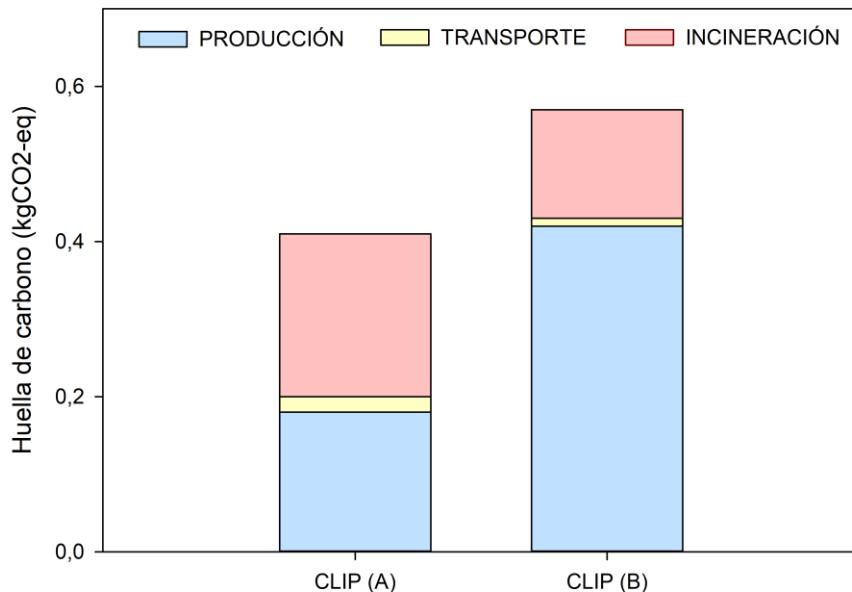


Figura 5.10: Emisiones de carbono en cada una de las etapas del ciclo de vida de los clips hemostáticos de las casas comerciales A y B.

La fase de extracción de materias primas y fabricación fue la etapa más importante del ciclo de vida junto con la fase de gestión de residuos, la incineración. La producción es responsable del 40 al 73% del impacto global del ciclo de vida, mientras que la gestión de residuos oscila entre el 24 y el 50%. Los accesorios tienen bajo peso y viajan en grandes contenedores de transporte transoceánico junto a otra mercancía, por ello las emisiones derivadas del transporte oscilaron únicamente entre 0,02 y 0,015 kgCO₂-eq por accesorio, resultados casi insignificantes en comparación con las otras etapas.

Además de las emisiones de GEI convertidas a huella de carbono en kgCO₂-eq, valoramos también otros indicadores ambientales. Así la acidificación es un indicador ambiental que se refiere a la disminución del pH en un determinado medio, ya sea suelo, agua o incluso la atmósfera a raíz de una actividad. Esta disminución del pH está asociada principalmente a la presencia de sustancias ácidas, como los óxidos de azufre y nitrógeno, que pueden provenir de fuentes naturales o actividades humanas. El consumo de agua y de minerales nos ofrece una visión del impacto ambiental que la producción de determinados productos puede causar. Por otra parte, la eutrofización es un fenómeno ambiental que

ocurre cuando un cuerpo de agua, ya sea dulce o salina, experimenta un aumento en los niveles de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes adicionales pueden provenir de fuentes naturales o actividades humanas, y su acumulación puede tener consecuencias significativas en la calidad del agua y en los ecosistemas acuáticos. La eutrofización es un indicador ambiental importante porque refleja cambios significativos en la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos.

Finalmente, la radiación ionizante se refiere a partículas y ondas electromagnéticas con la energía suficiente para ionizar átomos o moléculas al interactuar con ellos, lo que significa que puede liberar electrones de los átomos. Esta propiedad única de la radiación ionizante la hace valiosa como indicador ambiental en diversas aplicaciones. Existen normativas y límites establecidos para la exposición a la radiación ionizante con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente. Los organismos reguladores establecen estándares para garantizar que los niveles de radiación en el entorno estén dentro de límites seguros. La radiación ionizante sirve como un indicador ambiental, ya que su monitoreo constante y control son esenciales para garantizar la seguridad en diversas aplicaciones industriales, médicas y ambientales.

En la Tabla 5.3 mostramos los resultados de los impactos más relevantes por accesorio y casa comercial. Sólo se determinaron los impactos derivados de fabricación y el transporte, al no existir bases de datos de este tipo de indicadores ambientales para la incineración de estos materiales como gestión de residuos.

Los accesorios con mayor cantidad de acero durante su fabricación (pinza A y hemoclip B), presentaron valores de acidificación y consumo de recursos minerales y metales de hasta 5 o 6 veces superior. En cambio, el asa A emitió prácticamente el doble de radiación ionizante (0,012 kilobecquerelios) que otros accesorios como el asa D. La eutrofización y consumo de agua también fueron significativamente mayores en aquellos accesorios con mayor cantidad de SS. Por ejemplo, el consumo de agua del clip B ($0,142\text{ m}^3$) fue más de dos veces mayor que el del asa A.

5. RESULTADOS

Tabla 5.3: Resultado de otros indicadores medioambientales por accesorio y casa comercial.

(H⁺ eq iones hidrógeno equivalentes; m³, metros cúbicos; kg Sb eq, kilogramos de antimonio equivalentes; kg P eq, kilogramos de fósforo equivalentes; kBq, kilobecquerelios)

Indicador ambiental	Pinza			Asa			Clip	
	A	B	C	A	B	D	A	B
Acidificación (moles H ⁺ eq)	0,12	0,05	0,07	0,03	0,03	0,02	0,02	0,15
Consumo agua (m ³)	0,109	0,049	0,095	0,062	0,068	0,031	0,055	0,142
Consumo de minerales (kg Sb eq)	0,008	0,003	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002	0,01
Eutrofización terrestre (kg P eq)	0,71	0,30	0,39	0,173	0,16	0,14	0,13	0,86
Radiación ionizante (kBq)	0,009	0,007	0,008	0,012	0,008	0,006	0,007	0,009

5.2. Intervención de sostenibilidad en una Unidad de endoscopia y evaluación de su impacto

En el apartado 4.2 se detalló la metodología a seguir en la propuesta de sostenibilidad que se propone. Siguiendo esas directrices se realizaron 30 gastroscopias y 30 colonoscopias consecutivas donde se determinó el lugar más proximal donde hace contacto el accesorio con el canal de trabajo, y se midió la longitud desde este punto hasta el extremo distal. Esta distancia se calculó para los accesorios del gastroscopio (125,90 cm; intervalo de confianza (IC) calculado al 95 %, 125,54-126,26 cm) y para los accesorios del colonoscopio (190,03 cm; IC 95 %: 189,71-190,32 cm).

Se estableció la marca verde “green mark”, para indicar la parte no contaminada del accesorio, a 5 cm del límite superior del intervalo de confianza (131,26 cm para el gastroscopio y 195,32 cm para el colonoscopio). Esta acción permitió evitar la incineración a alta temperatura del mango y parte del cuerpo de pinzas de biopsias, asas de polipectomía y hemoclips (un 60-63 % de su peso total). Por ejemplo, para el caso del asa de

polipectomía A, la intervención evitó la incineración del mango (23,09 g de PP y 2,56 g de HDPE) y un 20 % del cuerpo del asa (2 g de HDPE y 1,4 g de SS), por lo que finalmente dejaron de emitirse 0,16 kgCO₂-eq (36 % del total del ACV).

El ahorro de emisiones en términos de kgCO₂-eq que supuso la intervención de sostenibilidad “green mark” por tipo de accesorio endoscópico y casa comercial se muestra en la Figura 5.11 para las pinzas de biopsia, Figura 5.12 para las asas de polipectomía y la Figura 5.13 para los hemoclips.

La aplicación de esta intervención de sostenibilidad implicó una reducción media del 34,3 % de las emisiones en el global del ACV (IC 95 %: 28,1-40,3 %).

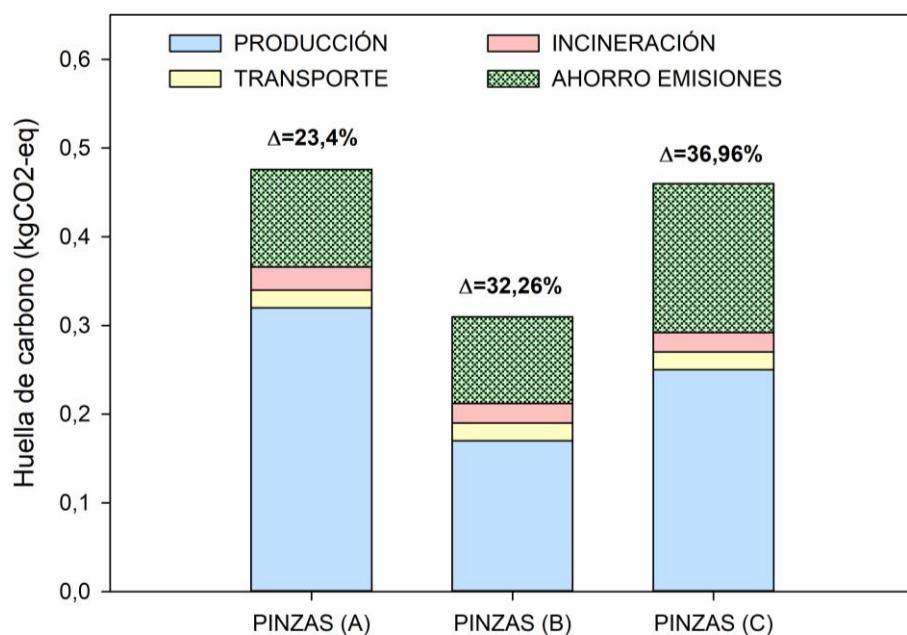


Figura 5.11: Emisiones de carbono evitadas al aplicar la intervención de sostenibilidad “green mark” en las pinzas de biopsia de las diferentes casas comerciales (A, B, C).

Durante la semana del estudio prospectivo de intervención sostenible (apartado 4.2.2), se realizaron 184 exploraciones (gastroscopias y colonoscopias) en la unidad de endoscopia del Hospital Universitario y Politécnico La Fe, Valencia. Para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades digestivas, entre los instrumentos a estudio, se utilizaron 143 accesorios endoscópicos (75 pinzas de biopsia A, 49 asas de polipectomía A y 19 hemoclips B. De acuerdo con nuestro ACV, en términos de impacto ambiental, únicamente en los accesorios de endoscopia, las emisiones de GEI alcanzaron 67,74 kgCO₂-eq en una semana.

5. RESULTADOS

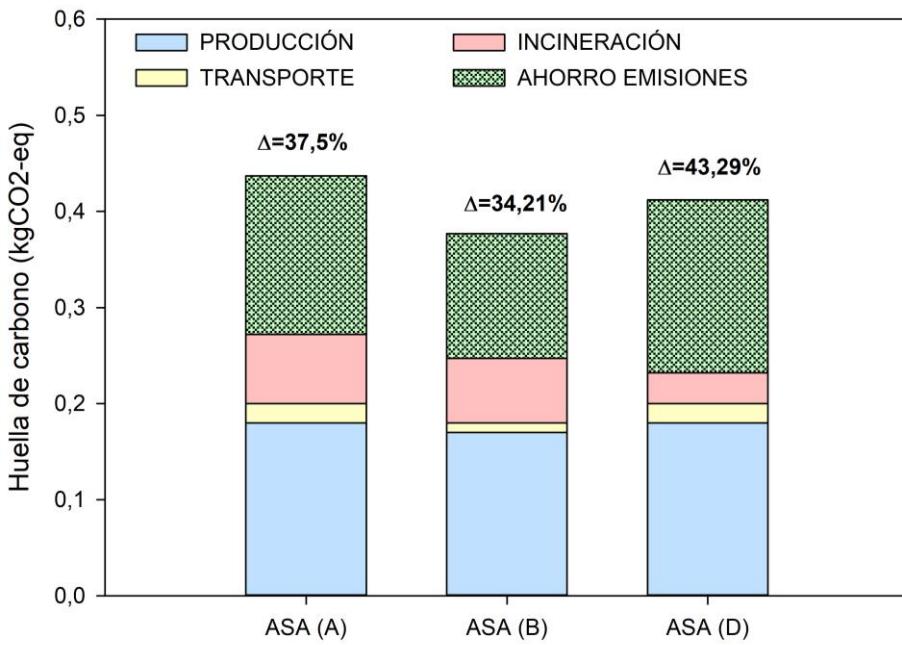


Figura 5.12: Emisiones de carbono evitadas al aplicar la intervención de sostenibilidad “green mark” en las asas de polipectomía de las diferentes casas comerciales (A, B, D).

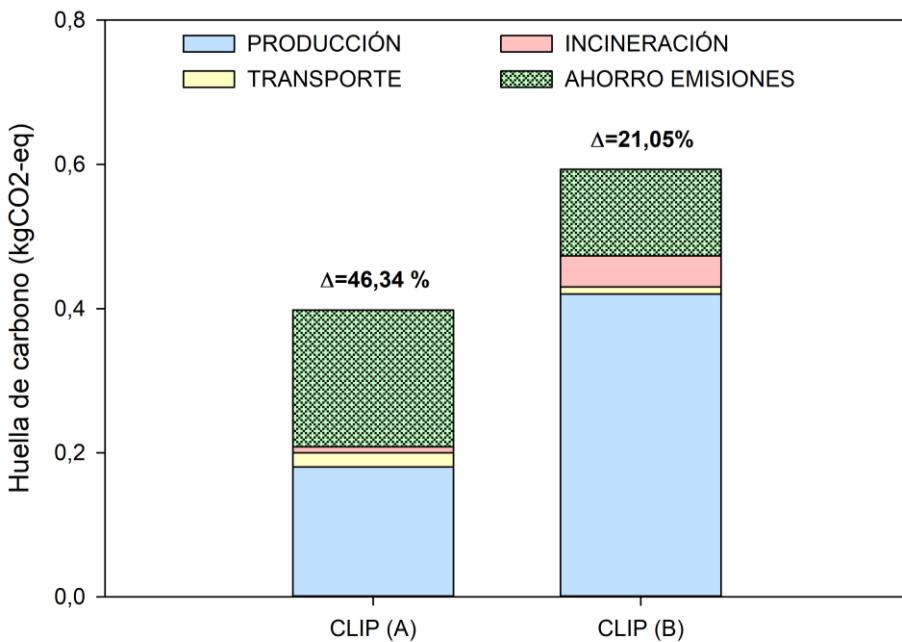


Figura 5.13: Emisiones de carbono evitadas al aplicar la intervención de sostenibilidad “green mark” en los clips hemostáticos de las diferentes casas comerciales A y B.

Aplicando nuestra intervención de sostenibilidad “*green mark*”, reduciríamos nuestro impacto ambiental hasta en un 27,44 % (18,26 kgCO₂-eq), y nos permitiría evitar la incineración del 61,7 % del peso de los RBM de los accesorios endoscópicos (un total de 4,69 kg semanales). La Figura 5.14 muestra de forma comparativa el impacto ambiental que supone el empleo de la propuesta. Teniendo en cuenta que se dejan de emitir 18,26 kgCO₂-eq semanales, aplicando de forma sistemática esta medida, el ahorro de emisiones de carbono sería similar a la producción en fábrica de 12.000 botellas de plástico o recorrer 15.200 km en ferrocarril.

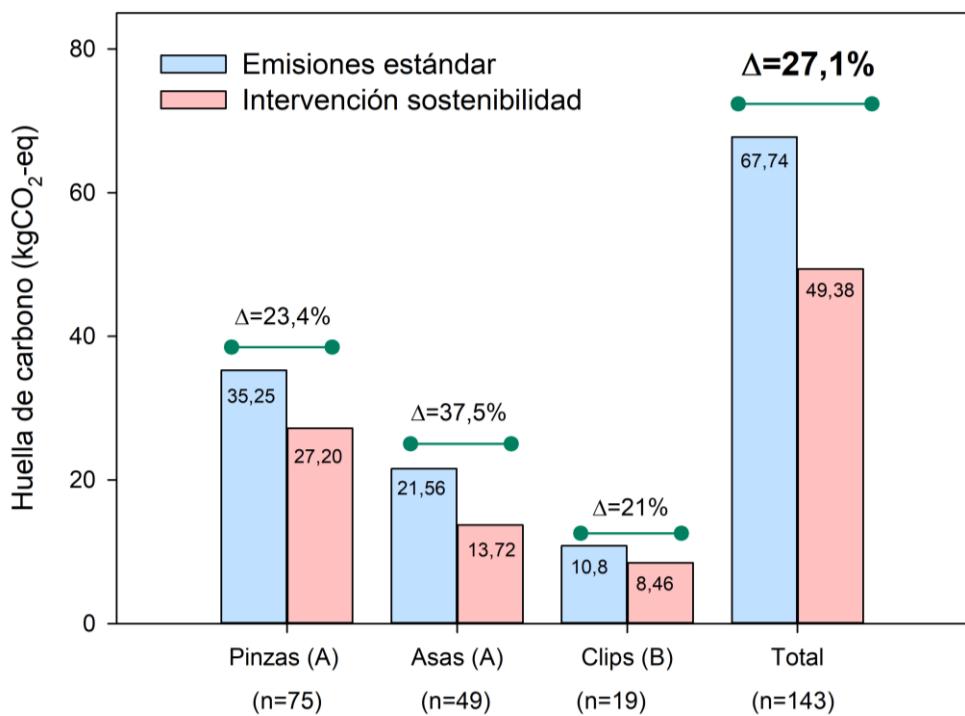


Figura 5.14: Resultados del estudio de intervención de sostenibilidad. Se muestran las diferencias de emisiones de carbono entre la actividad estándar respecto al aplicar la intervención de sostenibilidad.

5.3. Evaluación ambiental de duodenoscopios reutilizables y desechables

5.3.1. Análisis de la composición de duodenoscopios desechables y reutilizables

En el apartado 4.3 se establecieron los protocolos para el análisis de la composición de los duodenoscopios. Los resultados obtenidos en el estudio del peso y la composición

5. RESULTADOS

entre DR, DD-A y DD-B mostraron diferencias significativas. En efecto, los duodenoscopios DD-A y DD-B fueron tres veces más ligeros que el DR: 943 g, 715,5 g y 3489 g, respectivamente.

Después su inspección visual y fragmentación en más de 40 componentes, tal y como se indica en 4.1.1, para los polímeros plásticos se realizó la caracterización térmica mediante DSC y TGA y espectroscopía mediante FTIR. Para el análisis de los componentes metálicos se utilizó la microscopía FESEM con detector de EDX.

De este modo se estimó la composición estructural más probable de cada uno de los componentes de los duodenoscopios. La composición y peso de las diferentes partes de todos los duodenoscopios se muestran en la Figura 5.15. Los principales componentes del DR fueron aleaciones de metales (95%), como latón, aleaciones de níquel, aluminio y acero inoxidable. Sin embargo, el DD-A y el DD-B presentaron una composición principalmente de polímeros plásticos y resinas (70% el DD-A y 81% el DD-B). Entre los DD también existieron diferencias relevantes; en el caso de DD-A destaca la presencia de poliolefinas, ABS y poliéster-uretano (PEU). En el caso de la fabricación de DD-B se emplearon principalmente policarbonatos (PC) y politetrafluoroetileno (PTFE). Además, el DD-A presentó más del doble de acero inoxidable que el DD-B.

Los componentes de los DD, que fueron principalmente polímeros plásticos, tienen un GWP significativo, en particular el ABS del DD-A y el PC del DD-B. Cuando estos polímeros se incineran o degradan, liberan GEI que atrapan el calor de la atmósfera y dañan la capa de ozono. Sin embargo, el DR está principalmente compuesto por componentes metálicos, que tienen mejores posibilidades de reciclaje, reduciendo así la contribución al GWP. La proporción de materiales con alto o bajo GWP se muestran en la Figura 5.16.

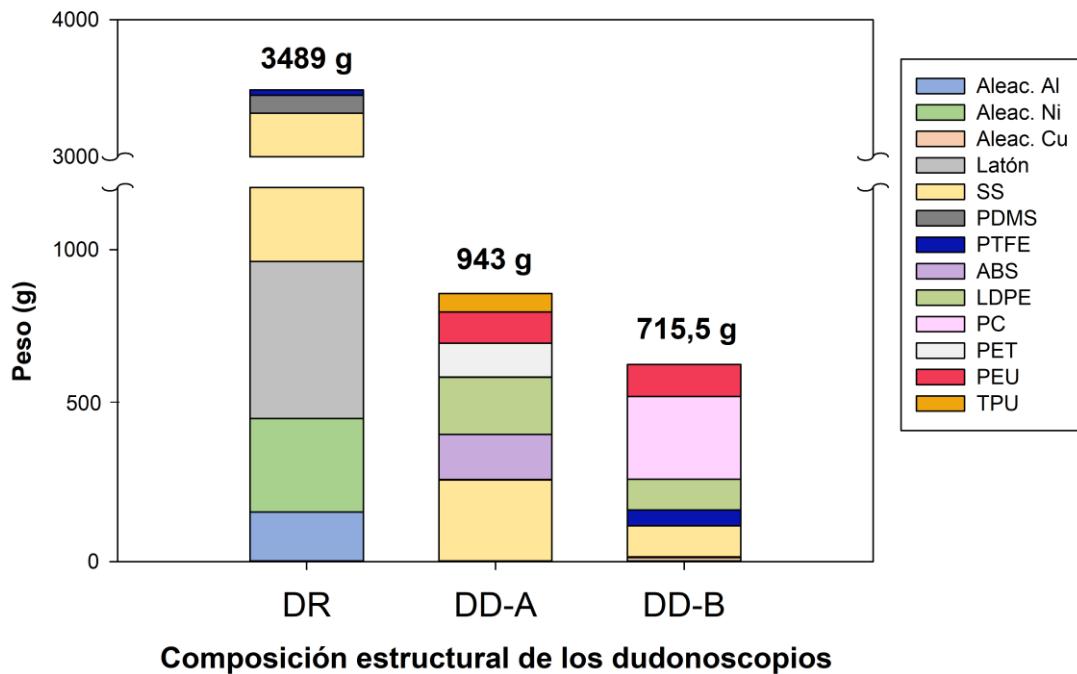


Figura 5.15: Resultados de la caracterización de los componentes de los duodenoscopios, por peso y diferentes materiales empleados en la fabricación. (DR, duodenoscopio reutilizable; DD-A y DD-B, duodenoscopios desechables; Aleac., aleación; Al, aluminio; Ni, níquel; Cu, cobre; SS, acero inoxidable; PDMS, polidimetilsiloxano; PTFE, politetrafluoroetileno; ABS, acrilonitrilo butadieno estireno; LDPE, polietileno de baja densidad; PC, policarbonato; PET, tereftalato de polietileno; PEU, poliéster-uretano; TPU, poliuretano termoplástico).

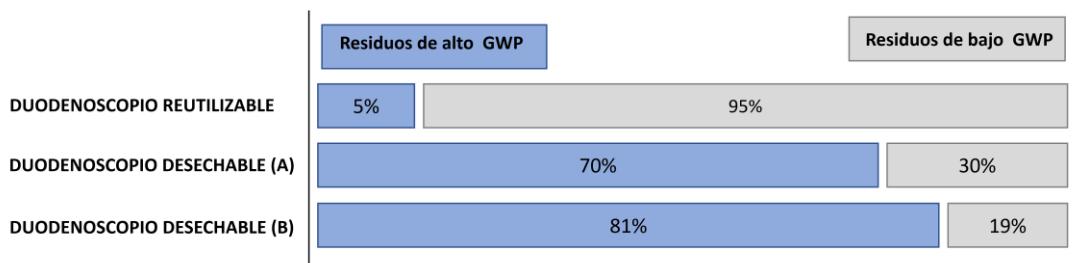


Figura 5.16: Composición de los materiales de los duodenoscopios en función del potencial de calentamiento global (GWP).

5. RESULTADOS

5.3.2. Análisis de ciclo de vida de duodenoscopios desechables y reutilizables

El protocolo de actuación para determinar el análisis de ciclo de vida de las muestras estudiadas aparece detallado en el apartado 4.3.2. Como era de esperar, las diferencias de peso y composición de los materiales en la fabricación de los duodenoscopios repercutieron notablemente en su impacto medioambiental.

Encontramos diferencias relevantes del impacto medioambiental en el ACV entre los duodenoscopios DD-A y DD-B (7,9 y 6,57 kgCO₂-eq por endoscopio, respectivamente).

El proceso de fabricación del DR produjo muchas más emisiones que los DD-A y DD-B (22,81, 3,72 y 3,21 kgCO₂-eq, respectivamente). La causa principal fue que el DR fue mucho más pesado que los DD y el análisis de la composición estructural de sus diferentes partes mostró alto porcentaje en aleaciones de metales, cuya producción libera más emisiones. No obstante, si tenemos en cuenta que el DR puede reutilizarse más de 1600 veces, las emisiones por procedimiento derivadas de la producción únicamente ascenderían a 0,014 kgCO₂-eq, 265 veces menos que las emisiones por procedimiento derivadas de DD-A. Asimismo, son más respetuosos con el medio ambiente en su disposición final, ya que los materiales de su composición (metálicos) se pueden reciclar con facilidad. Para DD-A y DD-B, que estaban compuestos principalmente por polímeros plásticos (residuos de alto GWP), la incineración fue la principal fuente de emisiones. La huella de carbono resultante de un único ciclo de vida, clasificada por producción, transporte, reprocesamiento e incineración, de cada uno de los duodenoscopios se representa en la Figura 5.17.

En el análisis medioambiental derivado del transporte, a pesar de que el peso entre los DD fue prácticamente similar, el itinerario del transporte de mercancías del DD-B fue menos complejo (8000 km de ruta transoceánica en barco de carga y 800 km de ruta continental en camión), respecto del de DD-A (18000 km ruta transoceánica). Esto supuso diferencias relevantes en las emisiones derivadas del transporte, que fueron el doble en el caso de DD-A (0,32 kgCO₂-eq). Por último, la incineración fue responsable prácticamente la mitad de las emisiones de carbono del ACV tanto para DD-B (49%), como para DD-A (48,9%).

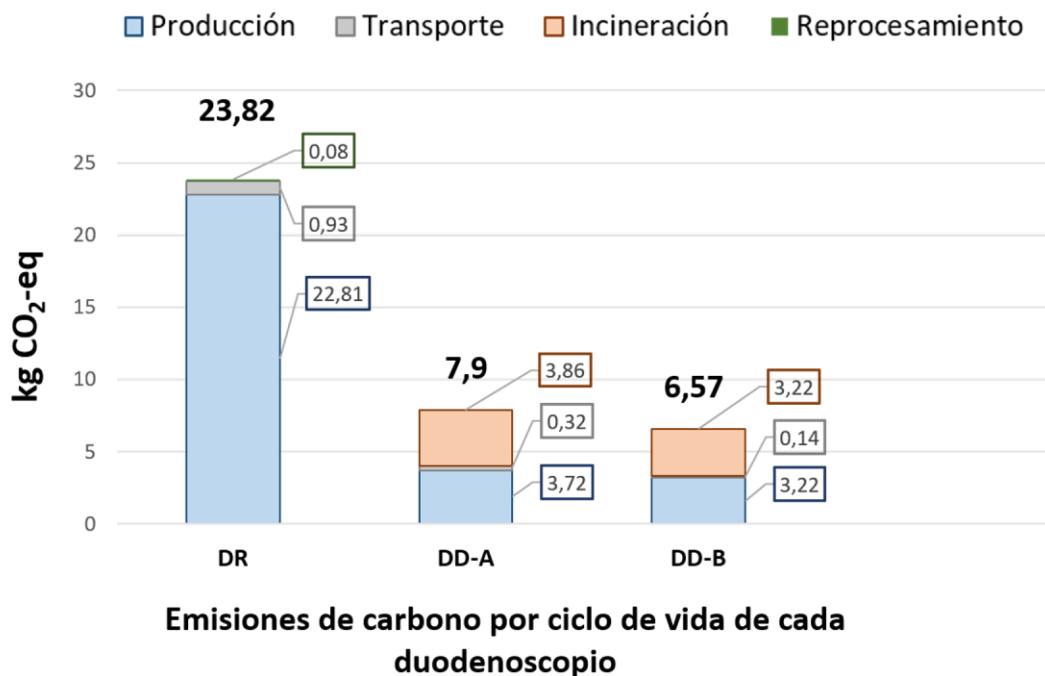


Figura 5.17: Huella de carbono expresada en kgCO₂-eq resultante de un ciclo de vida de cada duodenoscopio.

Además de la huella de carbono, evaluamos otros indicadores medioambientales que tienen un impacto relevante durante el ACV de los duodenoscopios. En términos de acidificación, consumo de agua, consumo de recursos minerales y radiación ionizante, la producción de un DR fue más perjudicial para el medio ambiente que los DD, ya que es un dispositivo más complejo y pesado. Al comparar los dos duodenoscopios de un solo uso, la acidificación fue el doble para el DD-A y el consumo de agua fue sustancialmente mayor. Sin embargo, no encontramos diferencias en la radiación ionizante y el uso de recursos. Los impactos de estos indicadores ambientales se muestran en la Tabla 5.4.

5. RESULTADOS

Tabla 5.4: Resultados de otros indicadores medioambientales de los diferentes duodenoscopios. (mol H⁺ eq, iones hidrógeno equivalentes; m³, metros cúbicos; kg Sb eq, kilogramos de antimonio equivalentes; kg U-235 eq, kilogramos de uranio 235 equivalentes).

	Tipo de duodenoscopio		
	Reutilizable	Desechable	
Indicador medioambiental	DR	A	B
Acidificación (mol H ⁺ eq)	0,16	0,02	0,011
Consumo de agua (m ³)	7,17	1,31	0,91
Recursos minerales (kg Sb eq)	0,00116	0,00012	0,00012
Radiación ionizante (kg U-235 eq)	0,95	0,15	0,15

5.4 Comparación de escenarios de sostenibilidad con el uso universal de duodenoscopios reutilizables y desechables

En el apartado 4.4 del anterior capítulo se establece el protocolo seguido para realizar la comparación de sostenibilidad. Ahora presentamos los resultados obtenidos al comparar el impacto medioambiental del empleo de un DR estándar para CPRE (fabricación, transporte y reprocesamiento) a lo largo de su vida útil con el uso universal de DD durante esta franja temporal. Asumimos una vida útil del DR de 8 años, con unos 1600 procedimientos en total. Se ha tenido en consideración que se realizan aproximadamente 5 CPRE por semana.

La huella de carbono total para un DR fue de 151,74 kgCO₂-eq. En el desarrollo de este ACV, la desinfección y el reprocesamiento (1600 ciclos) fueron responsables del 84% de las emisiones de carbono totales (0,08 kgCO₂-eq por ciclo de limpieza). Esta estrategia reutilizable fue de 82 a 62 veces más sostenible a lo largo de la vida útil de un DR que la implantación global de los duodenoscopios desechables (12640-10512 kgCO₂-eq), lo que en términos de emisiones de GEI es equivalente a climatizar una vivienda del tamaño de un apartamento durante 3 años [155].

En el caso de los DD, DD-A fue un 20 % más contaminante que DD-B a lo largo de la vida útil de un DR, diferencias medioambientales que ascienden a 2.128 kgCO₂-eq.

La huella de carbono del DR y los DD, evaluada por ACV a lo largo de la vida útil del DR, según la franja temporal a estudio, se muestra en términos absolutos la Figura 5.18 y en términos relativos en la Figura 5.19.

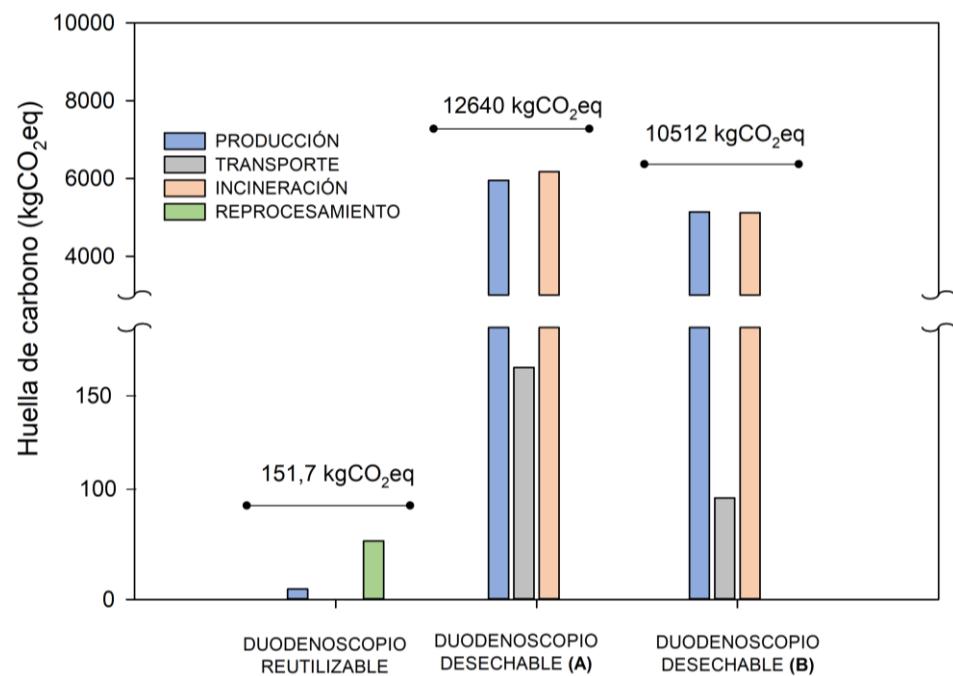


Figura 5.18: Comparación de sostenibilidad en términos de huella de carbono expresada en kgCO₂-eq, resultante del ACV total del DR respecto de la práctica general de CPRE mediante DD.

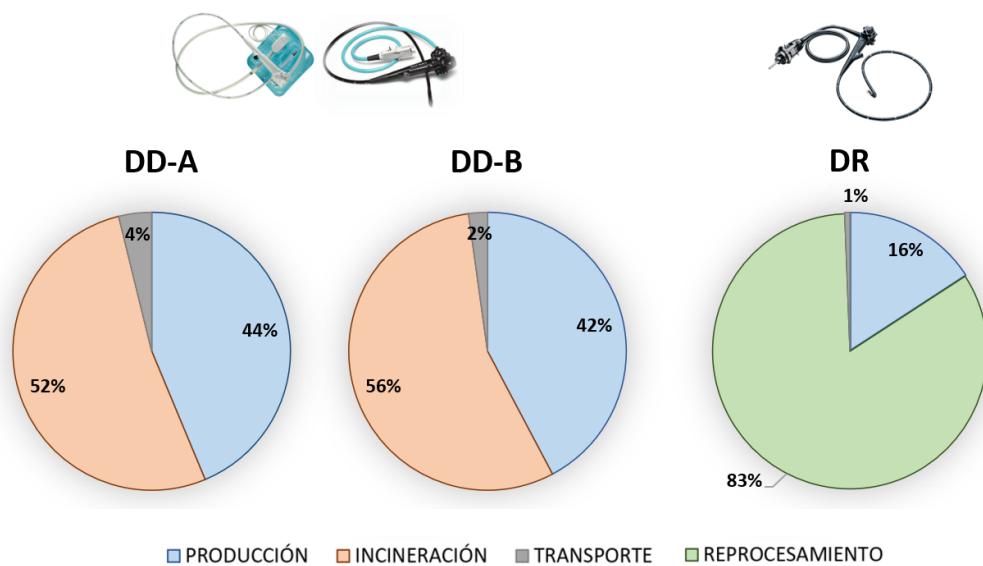


Figura 5.19: Frecuencias relativas de las emisiones de carbono de cada una de las etapas del ciclo de vida de los duodenoscopios desechables y reutilizables.

5. RESULTADOS

6. DISCUSIÓN

6. DISCUSIÓN

La endoscopia digestiva tiene un interés creciente y un papel cada vez más relevante en el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades del tracto digestivo, gracias al desarrollo de nuevos accesorios endoscópicos de un solo uso que se han ido incorporando a la práctica clínica en los últimos años. Este hecho ha generado un incremento masivo en el número de exploraciones endoscópicas, muchas de ellas terapéuticas, que conllevan un impacto medioambiental muy relevante, llegando a situarse en la tercera productora de residuos en el medio hospitalario.

El impacto medioambiental que supone el uso del material fungible y los nuevos endoscopios desechables no ha sido evaluado en profundidad. En otras palabras, no se han analizado las emisiones de GEI derivadas del ciclo de vida de los estos dispositivos, desde la extracción de materias primas en los lugares de origen, pasando por su fabricación y transporte, y finalmente su gestión de residuos, que como hemos comentado previamente, se consideran RBM y deben ser incinerados a alta temperatura.

En este trabajo se ha pretendido dar respuesta a necesidades no cubiertas en el campo de la sostenibilidad y endoscopia digestiva, proponiendo el desarrollo de métodos de análisis de la composición estructural de los accesorios de uso endoscópico y los endoscopios desechables, así como el estudio de su impacto medioambiental mediante ACV. Tras la obtención de estos datos, se han realizado propuestas de sostenibilidad y análisis de su eficacia medioambiental

6.1 Evaluación ambiental de los accesorios endoscópicos

En este protocolo de trabajo se ha estudiado la composición estructural de los accesorios endoscópicos y la evaluación su impacto ambiental con el objetivo de poder seleccionar la opción más sostenible entre las diferentes casas comerciales. El análisis de la composición de los accesorios mostró importantes diferencias en peso y en los materiales empleados en la fabricación por parte de los diferentes fabricantes, así como diferencias significativas en la huella de carbono. La aplicación de la propuesta de sostenibilidad “green mark” implicó una reducción media del 34,3 % de las emisiones en el global del ACV.

6. DISCUSIÓN

Este estudio se ha realizado de forma prospectiva con intervención multidisciplinar, combinando una investigación básica en un laboratorio de ingeniería y una investigación clínica para validar y evaluar el impacto medioambiental de las evidencias obtenidas y propuestas generadas.

En el estudio de investigación básica, se ha calculado el peso exacto y la composición estructural de los accesorios fungibles para así organizar sus materiales en base a su potencial de calentamiento global. Se analizaron pinzas de biopsia, asas de polipectomía y clips hemostáticos de hasta 4 casas comerciales diferentes. En el análisis medioambiental, en función de la naturaleza de estos materiales, se estimó el impacto de su producción, transporte y gestión de residuos. Por último, en la propuesta de sostenibilidad, se realizó una intervención de una semana para evaluar la mejora potencial en términos de impacto ecológico.

En el Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular de la Universidad Politécnica de Valencia, los instrumentos se fragmentaron selectivamente, se clasificaron según sus diferentes componentes y se pesaron. Se emplearon diversas técnicas de análisis instrumental y caracterización térmica y química, como FTIR, DSC, TGA, y FESEM / EDX, para verificar la composición estructural real de cada parte de cada uno de los accesorios endoscópicos. Se optó por este análisis dada la ausencia de información de los materiales empleados durante la producción de accesorios que aportan los fabricantes, sabiendo que conocer la composición es vital para estimar el impacto medioambiental. Gracias a esta investigación, se pudo determinar que cada fabricante utiliza materiales diferentes para la producción de accesorios, y que estas diferencias pueden tener consecuencias ambientales importantes.

En primer lugar, se encontraron diferencias relevantes en el peso de los diferentes accesorios, que llegan al 40 % del peso total entre algunos de ellos. Teniendo en cuenta que estas diferencias son para accesorios que en teoría tienen una misma función clínica, como puede ser la obtención de material histológico en el tracto digestivo, estas diferencias no parecen aceptables, y debemos encaminarnos al uso de aquellos dispositivos que sean más equilibrados, para restringir el uso de materias primas y así limitar la producción de residuos. De igual modo, el embalaje tuvo variaciones, con diferencias desde hasta el 50 % [139], y siempre con el empleo de plásticos, en vez de diseños más sostenibles con

cartón o celulosa. Todo ello denota que el embalaje puede también optimizarse, como se está haciendo recientemente en otras industrias como la textil o la alimentaria [156].

Debido a la correcta combinación de las técnicas de laboratorio de clasificación y caracterización, la determinación de todos los materiales que componen cada elemento se vuelve altamente precisa. Ninguno de los estudios de determinación de la huella de carbono en la actualidad posee este nivel de precisión, ya que suelen recurrir a información de terceros que podría no ser tan precisa como el análisis *in situ* que presentamos en este trabajo [16, 73]. Por ejemplo, si identificáramos el material del mango del hemoclip (A) sin realizar una caracterización adecuada, y asumiendo que se trata de, por ejemplo, LDPE en lugar de ABS, como ocurre en algunas publicaciones científicas [157, 158], la determinación de la huella de carbono variaría alrededor del 6 %.

A través de software de análisis medioambiental para la determinación del ACV, se observó que algunos materiales constituyen una alternativa más sostenible que otros durante la producción. Fabricar dispositivos utilizando polímeros como HDPE, LDPE y PP (2,07-2,3 kgCO₂-eq por kg de producción), emite menos emisiones de carbono que cuando se emplean otros como ABS y PC (3,22 y 3,73 kgCO₂-eq por kg, respectivamente), que son ampliamente empleados para la producción de accesorios y endoscopios desechables. Este escenario se presentó en nuestro trabajo, en donde los mangos de las asas de polipectomía de las casas comerciales B y D, y los de los clips hemostáticos de las casas A y B, están fabricados con ABS en lugar de alternativas más sostenibles como LDPE, HDPE y PP. Respecto al impacto de cada tipo de material sobre los diferentes indicadores medioambientales, el empleo en la producción de acero inoxidable contribuye mucho más a las emisiones de GEI que cualquier otro material (6,88 kgCO₂-eq por kg). Los accesorios con altas cantidades de acero inoxidable son los mayores contribuyentes al cambio climático, acidificación, ecotoxicidad de agua dulce y uso de recursos (agua, minerales y metales). Sin embargo, el acero inoxidable es el material con mayor potencial de reciclaje y el menor emisor de radiación ionizante (0,071 kBq por kg).

De los resultados de este trabajo se infiere que, además de las características técnicas y el coste económico, los fabricantes deberían proporcionar información sobre el impacto ambiental y la composición de los materiales utilizados para la fabricación de sus productos. Ya que, tras realizar el análisis, concluimos que elegir entre un fabricante u otro supone un impacto muy diferente en cuanto a la huella de carbono. Este escenario es

6. DISCUSIÓN

especialmente acusado en el caso de las pinzas de biopsia, con diferencias de hasta el 32 % de emisiones entre fabricantes (0,31-0,46 kgCO₂-eq), y en el caso de los clips hemostáticos, con hasta un 28 % de diferencias (0,41-0,57 kgCO₂-eq) [147]. En este sentido, la contaminación derivada del ACV de un solo accesorio asciende a 0,57 kgCO₂-eq, que a priori puede parecer banal, pero corresponde a unas emisiones de carbono equivalentes a la fabricación de hasta 9 botellas de agua de plástico.

Por esta razón, es especialmente atractivo conocer el nombre de las casas comerciales que ofrecen las alternativas más sostenibles para la adquisición de accesorios endoscópicos. Sin embargo, se ha preferido omitir esta información ya que la composición estructural de los accesorios no está disponible públicamente y no hay legislación al respecto que obligue a los fabricantes a aportar estos datos. Además, nuestro análisis se basa en estimaciones según el comportamiento de los materiales a los cambios de energía, temperatura y en base a sus propiedades moleculares. Estas estimaciones, aunque son de muy alta confianza, no permiten hacer asunciones categóricas que puedan tener consecuencias relevantes en el devenir económico y comercial de estas empresas. Si los datos de composición y huella de carbono se revelaran en etiquetas o catálogos, los profesionales podrían decidir sobre aquellos accesorios con una huella "más verde", obligando así a los fabricantes a perfeccionar las líneas de producción y a generar presión para que los gobiernos consideren la reutilización o reciclaje de estos accesorios en condiciones seguras y controladas.

Este trabajo abre las puertas a la posibilidad de llevar a cabo, en endoscopia digestiva, una gestión orientada a la sostenibilidad, lo que conocemos como "*green purchasing*", que es traducido del inglés como "compra verde o sostenible". Este concepto consiste en una estrategia empresarial que se refiere al proceso de adquisición en el que las empresas priorizan la inversión en productos y servicios respetuosos con el medio ambiente sobre aquellos con impactos ambientales negativos. El escenario ideal sería que todo el material e instrumentos endoscópicos llevasen una etiqueta ambiental que indicara su composición material, junto con un análisis exhaustivo de su ciclo de vida y huella de carbono. Este trabajo sienta las bases para crear estrategias dirigidas a mitigar la huella de carbono del sistema sanitario, gracias a un cambio en gestión clínica para adquirir material fungible como pinzas de biopsia, asas de polipectomía y hemoclips no solo en base a las

características prácticas o económicas del accesorio, sino también de su impacto medioambiental.

Dadas las recientes actualizaciones sobre el potencial de cambio climático, y la relevancia que ocupa el sistema sanitario en las emisiones de GEI globales, es imperativo evaluar con urgencia la huella de carbono global relacionada con los procedimientos endoscópicos de nuestra práctica diaria. Además, resulta esencial introducir nuevas intervenciones de mejora global de la sostenibilidad, siempre y cuando no comprometamos la atención médica de la más alta calidad. Hasta donde llega nuestro conocimiento, este es el primer trabajo que ha establecido con precisión la composición estructural de los accesorios de un solo uso que utilizamos con más frecuencia (pinzas de biopsia, asas de polipectomía y hemoclips) y su estudio medioambiental mediante un ACV global.

Para el desarrollo de una endoscopia sostenible, se han sugerido diversas estrategias, como i) la adherencia estricta a pautas de vigilancia endoscópica para evitar exploraciones innecesarias; ii) dar prioridad a la realización de gastroscopia y colonoscopia en una sola sesión, y a ser posible utilizando los mismos accesorios endoscópicos tanto para la vía alta como la baja en un mismo paciente; iii) el uso de endoscopios desechables debe estar justificado para indicaciones muy seleccionadas, sobre todo en casos de pacientes inmunodeprimidos, colonizados por microorganismos multirresistentes (MDRO, del inglés *multi-drug resistant organism*), pero también en situaciones donde la desinfección esté comprometida, como en áreas exteriores a la unidad de endoscopia (críticos, quirófanos) así como en horarios o situaciones de ausencia del profesional experto en el reprocesamiento; iv) minimizar el uso de frascos destinados al estudio de anatomía patológica; una intervención necesaria y posible sin alterar el devenir diagnóstico ni el pronóstico clínico del paciente. Podemos enfrentarnos a este reto sobre todo ayudados del diagnóstico óptico y la inteligencia artificial, para agrupar especímenes histológicos similares que no ofrezcan dudas de su potencial maligno; v) maximizar la disponibilidad de equipo de protección personal reutilizable en ciertos escenarios, que, con una desinfección adecuada, parece una estrategia razonable sin importantes consecuencias clínicas [48, 159].

Nuestro objetivo en esta área es sentar las bases de un cambio, para motivar a las empresas a aumentar su transparencia sobre la composición estructural de los materiales y el impacto medioambiental que genera el uso de sus dispositivos. Asimismo, nuestra

6. DISCUSIÓN

propuesta de sostenibilidad anima a crear sinergias con la industria tecnológica en el diseño de accesorios con un embalaje optimizado, utilizando los materiales más sostenibles para una misma función y promoviendo el uso de sistemas parcialmente reciclables o con alternativas en la gestión de residuos.

En el capítulo 4.2 se ha propuesto una intervención de sostenibilidad que permite hacer una gestión más eficiente de los residuos sanitarios, que no sólo promueve el reciclaje del embalaje de los accesorios, sino también propone un sistema para reducir los RBM que mandamos a incinerar, mediante la innovación tecnológica “*green mark*”. Así, marcando los determinados accesorios por el lugar que deja de estar en contacto con los fluidos y tejidos humanos, podemos separar la parte no contaminada y gestionar estos residuos de un modo diferente, ya sea mediante reciclaje u otros modos de gestión de residuos más sostenibles que la incineración.

La aplicación de nuestra intervención de sostenibilidad “*green mark*”, evita la incineración del mango y parte del cuerpo de los accesorios, por lo que seríamos capaces de evitar la incineración de hasta el 60 % del peso del dispositivo. Esta acción disminuiría drásticamente las emisiones derivadas de la incineración, y si lo trasladamos al total del ACV, constatamos una reducción de las emisiones que puede ir desde el 23,4 % en el caso de la pinza de biopsia (A) hasta el 46,3 % en el caso del hemoclip (B). Esta estrategia, llevada a cabo en nuestra unidad durante el tiempo de estudio, utilizando las pinzas de biopsia y asas de polipectomía de la casa A y los hemoclips de la casa B, consiguen una reducción de hasta el 27,1 % de las emisiones (18,26 kgCO₂-eq) [147]. Si esta medida la estandarizáramos en nuestra práctica clínica, extrapolando los resultados a un año de trabajo, las emisiones de carbono ahorradas se corresponderían a un escenario medioambiental equivalente a fabricar 12000 botellas de plástico, realizar un trayecto en tren de 17000 km o climatizar un apartamento durante 3 años.

Si comparamos nuestro trabajo con otros estudios de sostenibilidad, en otras disciplinas se ha examinado previamente el peso total del material fungible por cada procedimiento. En el campo de la cirugía, la histerectomía laparoscópica llega a producir 12 kg de residuos, mientras que otros procedimientos como la cirugía de cataratas, una neurocirugía estándar y una intervención de dermatología sobre el cáncer de piel producen 3, 8,9 y 2,6 kg de residuos, respectivamente [74, 160-162]. Asimismo, en endoscopia digestiva, otras publicaciones sobre sostenibilidad han estimado el total de residuos de una

única exploración endoscópica estándar, con aproximaciones que oscilan entre 0,5 y 2,1 kg [26, 28, 33]. En nuestro trabajo, teniendo en cuenta únicamente algunos de los accesorios de endoscopia, como las pinzas de biopsia, asas de polipectomía y clips, el total de residuos por procedimiento fue de aproximadamente 0,05 kg. Sin embargo, todo este peso es de residuos de tipo RBM, sin incluir otros accesorios que también entran en contacto con el paciente y no hemos analizado, así como otro tipo de material fungible que no hemos tenido en cuenta, véase tubos de aspiración, abrebotas, material de venopunción y sedación, contenedores de vacío e insuflación, guantes, entre otros.

Cunha Neves *et al.* demostraron que, tras una intervención educativa de los profesionales de la unidad de endoscopia, fue posible aumentar en gran medida los residuos reciclables y disminuir los RBM, adecuando los residuos que no requieren incineración a alta temperatura a los contenedores de residuos generales, que se disponen en vertederos. Realizaron una intervención que logró una reducción de los RBM de hasta el 41,1 % y de los residuos generales en un 12,9 %. De este modo, consiguieron minimizar la huella de carbono derivada de la gestión de residuos, con un ahorro de emisiones de GEI que llegó al 31,6 % [26]. En cambio, en nuestro trabajo no solo cuantificamos los residuos, sino que al caracterizar y analizar la composición estructural de los materiales y proporcionar datos sobre el ACV completo (producción, transporte y eliminación), podemos dar una visión más holística de todo el proceso de análisis medioambiental, y no centrarnos únicamente en la gestión de residuos.

En otros trabajos se evalúan globalmente las emisiones de una especialidad médica dentro del sistema sanitario, como es el caso del estudio de Whiting *et al.*, donde analizaron el impacto de las intervenciones quirúrgicas, y estimaron que el material fungible (32 %) y la energía (58 %) fueron los principales contribuyentes a la huella de carbono [163]. Los resultados obtenidos en nuestro estudio no reflejan la huella de carbono total relacionada con la endoscopia. Realizamos un análisis de una pequeña parte del total, centrando nuestra acción en accesorios de endoscopia desechables que utilizamos más frecuentemente, pero no tenemos en cuenta el resto del material fungible, la energía de la climatización y procesadores, los desplazamientos de pacientes y personal, el reprocesamiento de endoscopios, entre otros.

En esta línea, un trabajo reciente ha evaluado la huella de carbono global asociada a la endoscopia digestiva ambulatoria. En un estudio descriptivo y retrospectivo, Lacroix

6. DISCUSIÓN

et al. estiman el impacto medioambiental durante un año en su centro de trabajo, con más de 8000 procedimientos y 6000 pacientes. Realizan una evaluación holística de todas las fuentes de emisiones de carbono, ya sea con i) el equipamiento médico con procesadores, monitores y endoscopios; ii) el material fungible global, recogiendo el uso de fármacos y dispositivos médicos, pero también la alimentación y los servicios de limpieza y lavandería; iii) transporte de mercancías y desplazamientos de pacientes y profesionales; iv) energía, con consumo de electricidad y gas natural; y por último v) la gestión de residuos. Con este análisis tan pormenorizado, concluyen que la mayor fuente de emisiones proviene de los desplazamientos de pacientes y profesionales, así como del equipamiento médico (endoscopios, procesadores, máquinas de desinfección y reprocesamiento), y estiman que la huella de carbono derivada de un único procedimiento endoscópico representa unos 28,4 kgCO₂-eq [44]. Nuestro trabajo no plantea una exploración tan amplia, si bien no se basa en estimaciones, es decir, los materiales analizados apenas presentan incertidumbre ya que el método utilizado para el ACV incluye información precisa de la composición estructural. Según estos hallazgos, en comparación a los resultados de nuestro estudio, el consumo de un hemoclip supone alrededor del 2 % de la huella de carbono de una endoscopia estándar. Del mismo modo, en lugar de únicamente estimar el impacto medioambiental, nuestra propuesta de sostenibilidad representa una solución innovadora para reducir el impacto derivado de los accesorios fungibles, transformándolos en parcialmente reciclables.

Los accesorios endoscópicos, al entrar en contacto con el paciente y traspasar membranas biológicas, son dispositivos críticos según la clasificación de Spaulding. En las últimas décadas, ha habido una transición prácticamente completa desde reutilizable a completamente desecharable en el caso de estos accesorios. Algunas unidades de endoscopia conservan algunos dispositivos reutilizables, como las bujías utilizadas para dilatación de estenosis esofágicas complejas, los litotriptores mecánicos, las tijeras endoscópicas, guías metálicas y ciertas pinzas de cuerpos extraños. El resto de dispositivos, tanto de diagnóstico como de tratamiento, han ido diseñándose y adaptándose a dispositivos desecharables, con un único uso sobre un solo paciente. Para que un dispositivo endoscópico pueda reutilizarse, tiene que cumplir ciertos requisitos: En primer lugar es fundamental que sus materiales toleren los procesos de esterilización, y en segundo lugar debe tener la capacidad de desmontarse y volver a ensamblarse por completo para su correcta limpieza y

desinfección [164]. Además de presentar estas características, hay que tener en cuenta que los accesorios deben tener una gran longitud y un diámetro muy limitado para pasar el canal de trabajo del endoscopio. Todas estas razones hacen difícil garantizar su ensamblaje y esterilización adecuada después de cada reprocesamiento, lo que ha motivado su transición a desechables. Los accesorios endoscópicos desechables presentan numerosas ventajas, entre las que destacan, en primer lugar, la eliminación del coste del reprocesamiento; en segundo lugar, la ausencia de restos biológicos residuales que podrían albergar los accesorios reutilizables que no están bien esterilizados; y por último, la posibilidad de presentar una funcionalidad técnica óptima en cada procedimiento [87, 165, 166]. En cambio, la reutilización de las pinzas de biopsia podría no ser rentable en centros de bajo volumen de endoscopia, y además se ve afectada por la pérdida de funcionalidad debido a desgastes del revestimiento y procesos de oxidación de la parte metálica funcional [167]. Finalmente, la ESGE recomienda el uso de pinzas de biopsia, asas de polipectomía, esfinterotomos y hemoclips desechables en todos los pacientes [48].

Sin embargo, encontramos datos en contra de los accesorios desechables, principalmente la ausencia de evidencia científica de que las infecciones ocurren por el uso de accesorios reutilizables. Aunque varios estudios han planteado preocupaciones sobre la reutilización de accesorios en casos de reprocesamiento inadecuado o ineficaz, los brotes de infecciones no se han relacionado con el uso de accesorios reutilizables y el riesgo real de contaminación cruzada atribuible a la reutilización de accesorios sigue siendo objeto de debate [48, 168]. A diferencia de los accesorios desechables, los reutilizables podrían ser más económicos (al mantenerse funcionales durante varios usos) y presentar un menor impacto medioambiental [85, 169].

El enfoque de la investigación en las infecciones por contaminación cruzada se ha centrado especialmente en los duodenoscopios durante la CPRE. Si bien, parte de esta atención debería haberse dirigido a los accesorios endoscópicos antes de la transición masiva de éstos a dispositivos desechables. Aunque el uso de accesorios desechables ya se ha estandarizado y las sociedades científicas avalan su uso, esta recomendación no está sustentada por evidencia científica. De hecho, varios estudios sugieren que las pinzas de biopsia pueden esterilizarse de manera efectiva y mantener una funcionalidad razonable de forma repetida [169, 170]. Además, se ha demostrado que la inversión en pinzas reutilizables y en su reprocesamiento es significativamente inferior que la de sus

6. DISCUSIÓN

homólogos desechables [171]. El reprocesamiento inadecuado de los endoscopios, sobre todo del canal de trabajo, puede contribuir a la contaminación de estos accesorios, por lo que los esfuerzos deben ir encaminados a mejorar el reprocesamiento adecuado del endoscopio para evitar infecciones por contaminación cruzada [83]. Es más, el empleo de accesorios desechables no exime de este riesgo si el endoscopio no se reprocesa adecuadamente.

Los criterios para la reutilización de accesorios deberían ser redefinidos en función de la funcionalidad del dispositivo durante un número determinado de procedimientos, los factores de riesgo de infección del paciente y la eficacia del reprocesamiento para cada accesorio específicamente. A pesar de que restablecer el uso de accesorios reutilizables e implementarlos de nuevo en la práctica clínica parece tedioso y desafiante, y poco estimulante para la industria de fabricantes de dispositivos, nuestros esfuerzos colectivos deben enfocarse a prácticas que mejoren la sostenibilidad y disminuyan el impacto medioambiental [172]. Al igual que los capuchones desechables de los duodenoscopios para evitar la contaminación, la industria debe avanzar hacia soluciones innovadoras como accesorios parcialmente reutilizables. En nuestro trabajo demostramos que, si recicláramos o evitáramos la incineración de las partes no contaminadas de los accesorios, podríamos reducir el 27,44 % de las emisiones de CO₂-eq y se podría reciclar el 61,7 % del peso total del accesorio.

La investigación sobre el impacto de la gestión de residuos al final de la vida útil de los plásticos ha demostrado que la incineración es la vía que produce mayor cantidad de emisiones de GEI, seguida de la disposición en vertederos y el reciclaje [173, 174]. El método más seguro para desechar accesorios endoscópicos, que se consideran RBM, es la incineración a alta temperatura. Los incineradores reducen los residuos a una décima parte de su volumen original. Sin embargo, la incineración es un proceso térmico que conlleva riesgos ambientales como la eutrofización de agua dulce y la migración de metales pesados [30]. Por lo tanto, la reducción de los RBM en la unidad de endoscopia es una tarea esencial para mitigar el impacto ambiental. En nuestra intervención de sostenibilidad, aplicando la estrategia “green mark”, durante una semana fragmentamos con alicates los dispositivos para disminuir el volumen de RBM y evitar la incineración. No obstante, una limitación importante supone que, según la legislación vigente europea, todos los dispositivos de uso médico desechables deben ser enviados a incinerar, por lo que tras realizar el pesado y

análisis de composición estructural, finalmente tuvimos que incinerar los materiales. En consecuencia, las emisiones de carbono ahorradas se lograron solo en términos teóricos. Si bien, la legislación puede variar según el país, y el efecto beneficioso de nuestra idea de la “green mark” puede diferir según las diferentes políticas de gestión de residuos.

El propósito de este trabajo es sentar las bases para el desarrollo de equipos de endoscopia diseñados de manera sostenible, ya sean accesorios con mangos reutilizables, dispositivos parcialmente reciclables o partes activas de instrumentos completamente reciclables. El control de infecciones por contaminación cruzada es una preocupación y en nuestro estudio no realizamos estudios microbiológicos para evaluar el riesgo potencial de contaminación de la parte del accesorio potencialmente reciclabl. Esta es un área de investigación interesante en la que ya estamos trabajando, para poseer la evidencia científica suficiente que apoye el diseño de nuevos dispositivos sostenibles con una barrera de control de infecciones.

Nuestro estudio encontró otras limitaciones para calcular el impacto ambiental. No se tuvo en cuenta el transporte de los contenedores de RBM, que incluyen los residuos de los accesorios, tras su uso clínico hasta los incineradores. Por otro lado, al evaluar las emisiones del final de la vida útil, no pudimos encontrar bases de datos de software de ACV que incluyeran información sobre emisiones derivadas de la incineración de los diferentes materiales que detectamos (polímeros, metales). En consecuencia, la incineración tuvo que estimarse según referencias bibliográficas [26, 144]. De igual manera, no consideramos la fase de ensamblaje durante el proceso de fabricación, ya que no estaba incluida en las bases de datos del software de ACV. Esta fase podría aumentar ligeramente los valores finales de la estimación de la huella de carbono, pero el mismo aumento se aplicaría a todos los accesorios, ya que están involucrados procesos similares. Ahora bien, reconocemos que no se consideraron las emisiones derivadas de los manuales de usuario (principalmente de papel). Sin embargo, estos manuales únicamente representan valores notables en caso de dispositivos y equipos complejos, siendo inferior a 0,05 kgCO₂-eq para cualquiera de los accesorios que hemos analizado. Por último, no se realizó un análisis de sensibilidad para probar diferentes escenarios, y recurrimos a algunas estimaciones basadas en otras fuentes, por lo que la huella de carbono total puede asumir cierta incertidumbre, pero creemos que las desviaciones de los valores reales se han reducido tanto como es posible. Así pues, todas estas limitaciones ponen de manifiesto que

6. DISCUSIÓN

se trata de un estudio piloto de sostenibilidad en el medio hospitalario, y que necesitamos enfoques estandarizados, prospectivos y multidisciplinares para realizar ACV complejos en nuestro campo.

En conclusión, el análisis medioambiental de los accesorios endoscópicos es fundamental para seleccionar las alternativas más sostenibles. Además, es importante evaluar la huella de carbono en kgCO₂-eq de nuestro fungible para crear conciencia y cambiar nuestra toma de decisiones clínicas. Estas novedades abren una nueva competencia en el mercado para instrumentos producidos con principios sostenibles.

6.2 Evaluación ambiental de los duodenoscopios

Este este segundo protocolo de trabajo se ha analizado el peso, la composición material y el ACV de duodenoscopios desechables y reutilizables, así como la comparación de sostenibilidad entre diferentes estrategias de uso de los diferentes duodenoscopios. El análisis de la composición mostró diferencias significativas en los duodenoscopios que repercutieron notablemente en su impacto medioambiental, siendo la estrategia reutilizable de entre un 62 a 82 veces más sostenible que el uso desechable a lo largo de la vida útil del endoscopio.

Este estudio, al igual que el previo, combina investigación básica en un entorno de laboratorio de ingeniería con investigación clínica para validar y evaluar el impacto ambiental. Se calculó el peso exacto y la composición estructural de duodenoscopios para así organizar sus materiales en base a su potencial de calentamiento global. Se llevó a cabo el análisis de composición y medioambiental de 2 casas comerciales diferentes de DD. Se emplearon diversas técnicas de análisis instrumental y de caracterización térmica y química, que se han comentado previamente, como FTIR, DSC, TGA, FESEM / EDX. Con ello, en función de la naturaleza de estos materiales, se realizó un análisis medioambiental para estimar el impacto de la producción, transporte y gestión de residuos de los duodenoscopios.

Nuestro trabajo es, hasta la fecha, el primer estudio que ha evaluado y comparado la composición estructural de los diferentes DD en comparación con un DR. Al realizar un ACV en base a datos fehacientes de composición, se convierte en la primera fuente fiable de la huella de carbono que emiten los DD. Además, se realizó un análisis de las

necesidades derivadas de la desinfección y reprocesamiento, teniendo en cuenta el consumo de agua, energía y detergentes. Por último, se llevó a cabo una estimación de las emisiones de carbono de la práctica de CPRE durante toda la vida útil de un DR (unos 8 años). Se comparó un escenario medioambiental hipotético en el que utilizáramos los DD de forma universal respecto al impacto ecológico tradicional derivado de la práctica de CPRE utilizando DR (incluyendo las emisiones del reprocesamiento).

El análisis de la composición material reveló diferencias sustanciales entre el DR y los DD. El DR fue tres veces más pesado que los DD y los materiales utilizados en su fabricación son aleaciones metálicas (95 %), como latón, níquel y aleaciones de aluminio y acero inoxidable. Al comparar ambos desechables, DD-A fue hasta un 32 % más pesado que DD-B, y las dos casas comerciales utilizaron polímeros plásticos y resinas en su fabricación, que llegan hasta el 70-81 %. En el caso de DD-A predominaron materiales como LDPE, ABS y PEU, frente a PC y PTFE en el caso de DD-B. A través del software de ACV, nuestros cálculos indicaron que los polímeros más sostenibles para utilizar en el proceso de fabricación son PET, HDPE, LDPE y PP (0,7-2,3 kgCO₂-eq por kg de producción) y que el metal más sostenible es el latón (2,14 kgCO₂-eq por kg de producción), mucho más que el acero inoxidable (6,88 kgCO₂-eq por kg). Los polímeros que presentan mayor impacto ambiental son el PEU termoplástico (5,33 kgCO₂-eq por kg) y PTFE (12,77 kgCO₂-eq por kg). Mientras tanto, los componentes metálicos menos sostenibles fueron las aleaciones de aluminio y níquel (11,8 y 12,8 kgCO₂-eq por kg, respectivamente). Estos datos resaltan la necesidad de que las empresas de diseño de dispositivos de uso médico sean conscientes del impacto ambiental que ocasionan ciertos materiales y proporcionen información detallada sobre la composición y las emisiones de carbono durante el proceso de fabricación de sus dispositivos.

En esta línea, no solo se evaluaron las emisiones de carbono, sino que estratificamos los materiales de los DD y el DR en función del potencial de cambio climático de sus residuos. Por su alto contenido en metales, los materiales del DR apenas suponen un 5 % de residuos con alto GWP, mientras que el DD-A y el DD-B suponen un 70 % y 81 % de residuos de alto GWP, respectivamente. Esto quiere decir, que al final de su vida útil, ya sea mediante su combustión o degradación, estos residuos contribuyen significativamente a la liberación de GEI perjudiciales para el medio ambiente. Los metales tienden a tener un GWP generalmente menor en comparación con ciertos plásticos debido a que las

6. DISCUSIÓN

emisiones de GEI generadas en su producción suelen ser contrarrestadas por los beneficios de la posibilidad de su reciclaje [90].

En términos de sostenibilidad, si agrupamos las emisiones derivadas de la fabricación, el transporte, el reprocesamiento y la gestión de residuos de todos los duodenoscopios, un único DD genera unas emisiones tres veces inferiores al DR (23,8 kgCO₂-eq frente a 7,9 kg y 6,57 kgCO₂-eq de los DD). Esto es debido a que la producción del DR (22,81 kgCO₂-eq) es un método complejo y con necesidad de alta cantidad de metales. No obstante, tenemos que tener en cuenta que la fabricación de un DR es suficiente para utilizarlo durante más de 8 años, y que el impacto medioambiental del reprocesamiento es muy inferior a todo lo que supone un ACV global de cada uno de los DD. Las tareas de desinfección y reprocesamiento se utilizan con frecuencia para justificar el uso de endoscopios desechables por contribuir notablemente en el coste económico y el impacto medioambiental de los endoscopios reutilizables [175, 176]. Sin embargo, nuestro trabajo revela que realmente el procesamiento supone una fracción poco representativa de emisiones, 128 kgCO₂-eq durante la vida de un DR, respecto a la contribución de la gestión de residuos del mismo número de procedimientos en los que se utilizan DD (6.176-5.152 kgCO₂-eq). Al realizar una estimación de sostenibilidad de la estrategia tradicional frente a la desecharable, demostramos que el uso rutinario de DD es entre 62 y 82 veces más contaminante. Las emisiones globales de un DR durante 8 años son 151,74 kgCO₂-eq, frente a los 12.649 kgCO₂-eq emitidos si realizáramos todas las CPRE mediante DD-A durante el mismo periodo de tiempo. Esta diferencia es equivalente a un escenario ambiental en el que hubiera que fabricar 22.000 botellas de plástico.

La CPRE es una intervención de endoscopia avanzada de importancia capital en las enfermedades digestivas, tanto para el tratamiento de la ictericia obstructiva maligna, como para descomprimir la vía biliar y pancreática de posibles litiasis, entre muchas otras indicaciones. En sus inicios, se trataba de una exploración que se utilizaba en muchas ocasiones como herramienta diagnóstica, con estudios de colangiografía y pancreatografía. En cambio, debido al riesgo inherente del procedimiento, ya sea por pancreatitis aguda, infecciones, hemorragia o perforación, su función actual es eminentemente terapéutica. El riesgo de pancreatitis aguda post-CPRE oscila, según diversos metaanálisis, entre el 3,5 % [177] y el 9,7 %, si bien, estratificados los pacientes por aquellos de alto riesgo, puede llegar al 14,7 % [178]. Asimismo, el riesgo de infecciones (1,4 %), sangrado (1,3 %) y

perforación (0,6 %) tampoco son desdeñables [177]. Por ello, en la actualidad recurrimos a la CPRE una vez se ha realizado una aproximación diagnóstica previa, mediante pruebas de imagen o ecoendoscopia, y se ha establecido una clara indicación del procedimiento.

Los duodenoscopios que utilizamos para CPRE presentan visión lateral, y el extremo distal posee un sistema elevador para dirigir los accesorios adecuadamente al interior de las vías biliares y pancreáticas. Este diseño de mayor complejidad, le infiere un riesgo más elevado de contaminación por microorganismos, debido a las dificultades que presenta la desinfección y reprocesamiento de estos endoscopios [179]. Las razones que se han propuesto son i) el error humano y la variabilidad de métodos de reprocesamiento [180]; ii) el desgaste derivado del uso repetitivo del duodenoscopio [181]; y iii) defectos físicos del canal de trabajo por los múltiples pases de los accesorios que podrían albergar contaminación microbiana [182]. Estas preocupaciones han motivado el reciente desarrollo de DD, que requieren de continuos procesos de fabricación y transporte a los lugares de trabajo, junto con una desproporcionada gestión de residuos.

Realmente, la infección asociada a contaminación cruzada por duodenoscopios, ha resultado ser extremadamente baja (1 de cada 20000-1,8 millones de exploraciones) [92] y una mortalidad ínfima de 1 de cada 150.000 procedimientos [93]. Por lo tanto, los datos disponibles indican que el riesgo de infección clínicamente relevante, tras un reprocesamiento adecuado, es probablemente mínimo, aunque no nulo. El objetivo para reducir las infecciones relacionadas con los duodenoscopios debe limitarse a una tasa razonablemente practicable, de manera que el coste económico, ambiental y social al intentar reducir el riesgo de infecciones no supere los beneficios obtenidos [48]. Es por ello que se necesitan datos basados en evaluaciones del ACV de endoscopios de un solo uso y estudios comparativos con resultados clínicamente relevantes para poder hacer recomendaciones formales sobre uso de forma universal. No obstante, este desarrollo y aprobación de DD se ha llevado a cabo sin una adecuada evaluación de riesgos poblacionales, de tipo medioambiental, que implicarían el uso universal de endoscopios de un solo uso.

Las diferencias medioambientales entre ambas estrategias, reutilizable y desecharable, son abrumadoras. Si bien es importante reseñar cuál es el impacto de la adopción global de endoscopios desechables para crear conciencia en este sentido, de momento ninguna sociedad científica apoya su uso universal y la ESGE recomienda su uso

6. DISCUSIÓN

en casos seleccionados [48]. Es por ello que la estrategia desecharable global no refleja adecuadamente el uso actual de estos duodenoscopios. Si queremos evaluar el impacto ambiental que están teniendo en centros que están implementando su uso, tenemos que dar por hecho que el uso de los DD está siendo ocasional. En algunos hospitales se está llevando a cabo la realización de exudados rectales antes de la realización de CPRE, para cultivar y prever la colonización de MDRO en los pacientes a los que se va a someter al procedimiento. En los casos en los que el resultado es positivo, optan por realizar la CPRE mediante un DD. Además, en aquellos pacientes cuya presentación clínica es el shock séptico y requieren CPRE de forma urgente, también optan por usar el DD, al no haber podido testar si este paciente está colonizado por MDRO. La tasa aproximada de pacientes colonizados por MDRO es del 4,3 % [183] y las ocasiones en las que hay que realizar una CPRE urgente en menos de 24 horas es alrededor un 8,2 % [184]. Si dejáramos de utilizar el DR en estos dos escenarios durante toda su vida útil (1600 usos), aún realizaríamos con él 1405 procedimientos, mientras que se utilizaría el DD en 63 pacientes por la colonización de MDRO y 132 pacientes por urgencia. Esta estrategia reutilizable con uso ocasional de DD tendría un impacto medioambiental 10 veces menor respecto al uso indiscriminado de DD (1.597,64 kgCO₂-eq en el caso de DD-A y 1.351,59 kgCO₂-eq en el caso de DD-B), pero todavía seguiría siendo 10 veces más contaminante que el empleo estándar de DR (151,7 kgCO₂-eq).

Las diferencias entre DD-A y DD-B abren la posibilidad del “green purchasing” entre diferentes duodenoscopios de un solo uso. Cuando hay un procedimiento de CPRE de alto riesgo de contaminación y está justificado el uso de DD, podríamos seleccionar las opciones más sostenibles. En este sentido, reconocemos que algunos lectores preferirían que incluyéramos los nombres de las empresas, pero como indicábamos previamente, no hay legislación que obligue a estas compañías tecnológicas que se dedican al diseño y fabricación de endoscopios, a proporcionar información sobre la composición material. Se trata de un estudio mediante análisis instrumental y ambiental, que, aunque es muy preciso, presenta ciertas limitaciones en términos de incertidumbre, y no consideramos que tenga la capacidad para justificar las consecuencias de alta trascendencia económica y estructural que supondría la publicación del nombre de las empresas. Nuestro objetivo en este ámbito es alentar a las empresas a crear diseños de endoscopios parcialmente reciclables y con opciones de gestionar los residuos de forma sostenible, así como aumentar la transparencia

sobre la información detallada de la composición estructural y las fuentes de materias primas que utilizan.

En términos de las últimas recomendaciones del uso de dispositivos desechables y el procesamiento de los reutilizables, la FDA emitió una comunicación de seguridad en 2022 que recomienda la transición de los DR más antiguos a otros modelos más novedosos. Esta recomendación se basa en que los modelos antiguos presentan una tasa de contaminación de MDRO que oscila entre el 4 y el 6 %. En cambio, los nuevos diseños facilitan las tareas de reprocesamiento, presentan en su extremo distal capuchones desechables que evitan que estos microorganismos queden acantonados en el sistema elevador y el canal de trabajo. Con esta innovación, han conseguido tasas del 0 % en fallos del reprocesamiento y del 1,1 % de colonización con microorganismos resistentes [102].

A pesar de estos datos tan favorables para los DR, los DD pueden resultar económicamente rentables en unidades de cuidados intensivos o bloques quirúrgicos debido a la mayor probabilidad potencial de que los pacientes hospitalizados en estos lugares estén colonizados con MDRO. También podrían tener un papel en clínicas y hospitales con bajo volumen de CPRE, que no desean invertir en equipos de desinfección y reprocesamiento [104].

Varios estudios han evaluado la funcionalidad práctica, técnica y clínica para llevar a cabo CPRE mediante DD. En un ensayo clínico aleatorizado, en el que intervinieron 98 pacientes, a los que se les aleatorizó para el uso de DD y de DR para resolver un problema clínico mediante CPRE, no encontraron diferencias significativas en términos de éxito en la canulación papilar, necesidad de métodos de canulación avanzada, ni en efectos adversos incluyendo mortalidad [185]. Otro estudio multicéntrico consiguió tasas de éxito en las CPRE con DD de hasta el 95 %, teniendo en cuenta que el 5 % restante de tasa de fracaso no fue inherente al DD, sino que ocurrió por causas que no se pudieron solventar tampoco con un DR, como una estenosis duodenal. Los participantes del estudio otorgaron una satisfacción al dispositivo de entre 7 y 9 sobre 10 [186].

Las empresas que comercializan estos DD y abogan por el uso universal de dispositivos de un solo uso, además del teórico riesgo de contaminación, aluden a la dificultad y coste del reprocesamiento. Esta actividad requiere contratar y entrenar a profesionales expertos en la desinfección y la gestión de residuos, así como la inversión de

6. DISCUSIÓN

gabinetes de almacenamiento y secado de endoscopios. Estas compañías justifican el uso de DD mediante estimaciones que se basan en un alto coste de productos de reprocesamiento, y atribuyen al DR altas tasas de infección y largas estancias en cuidados de críticos como consecuencia. Con ello, estiman que el coste del ciclo de reprocesamiento en centros de baja incidencia de CPRE (50 al año), podría ser entre 800 y 2700 dólares estadounidenses [104]. Sin embargo, estos estudios deben interpretarse con cautela, por posibles intereses comerciales.

Los datos económicos fehacientes que disponemos es que el coste de cada DD oscila entre 1.700 y 3.600 euros [107], por lo que si universalizáramos el uso de DD para todas las CPRE que se realizan, el coste adicional serían de millones de euros. En esta misma línea, si suponemos una tasa de infección de un 0,4 % con DR, y tenemos en cuenta que se realizan en EEUU unas 400.000 CPRE anuales, aproximadamente ocurrirían unas 1600 infecciones. Si el precio de un DD está en torno a 2500 dólares, la inversión financiera del uso universal de DD es de 1.000 millones de dólares al año. Esta cifra está muy lejos del gasto derivado al tratamiento de estas infecciones, y es 5 a 10 veces superior al gasto que está estipulado invertir para justificar una medida de gestión clínica en estudios de coste-efectividad del sistema sanitario. Por este motivo, el esfuerzo económico de universalizar el uso de DD es difícilmente justificable [187].

En términos de la inversión en el dispositivo, un estudio holandés evaluó el precio de mercado que deberían tener los DD para estar igualados con los DR, del inglés “*break-even analysis*”. Compararon su práctica habitual, en la que utilizan DD únicamente si el paciente posee un cultivo de exudado rectal positivo para MDRO (cultivo que realizan a todos los pacientes antes de la CPRE), con la adopción global de DD. Tuvieron en cuenta el precio de los análisis microbiológicos, los costes de las infecciones asociadas a contaminación cruzada de duodenoscopios (unos 6.800 euros en su centro), y asumieron una tasa de infección de entre 0,1-1,5 %. Determinaron que, incluso para la tasa más elevada de infección (1,5 %), el precio que debería tener el DD para estar al mismo nivel que la práctica estándar con DR debería ser de 242 euros (10 veces menos que su precio actual). Estas diferencias se suavizan en el caso de hospitales con un bajo volumen de CPRE (menor de 50 anuales), con precios de *break-even analysis* del DD que deberían oscilar entre 500 y 1200 euros para equipararse al DR [184]. Es probable que las cifras correspondientes sean considerablemente más altas en los EEUU, teniendo en cuenta el

teórico coste desproporcionado del manejo de infecciones relacionadas con los duodenoscopios. Esta posibilidad quedó reflejada en un análisis de coste-utilidad en un hospital estadounidense, donde el uso de DD resultó ser más rentable que el uso de DR. Si bien, tuvieron en cuenta escenarios determinados, en los que la tasa de infección fue superior al 1 %, y el coste derivado de la hospitalización por la infección fue de 375.000 dólares [188]. De estos resultados podemos concluir que para hacer un análisis coste-efectivo adecuado, debe considerarse tanto la incidencia de infecciones, el volumen de procedimientos y el coste del tratamiento hospitalario.

Por todas estas razones, a la hora de comparar estrategias reutilizables y desecharables, con idea de implantar modelos de economía lineal (duodenoscopios desecharables), tiene que tenerse en cuenta el coste económico y la funcionalidad clínica, pero también los factores ambientales, ya que tienen graves consecuencias sanitarias y económicas al medio y largo plazo. La práctica clínica con CPRE mediante DD produciría 60 veces o más emisiones de carbono que la estrategia convencional.

En determinadas condiciones y escenarios controlados, algunas soluciones de gestión de residuos de tipo sostenibles pueden ayudar a reducir el total de residuos y al mismo tiempo aprovechar la energía. Estrategias de aprovechamiento energético a partir de la combustión de residuos, como la técnica *waste-to-energy* (WtE) se han postulado recientemente para mitigar el impacto medioambiental [105]. En estos incineradores o plantas de valorización energética, existe un aprovechamiento energético que depende de múltiples factores, como el valor calorífico de los residuos, la eficiencia de la incineración y la tecnología utilizada para la recuperación de energía. Los RBM suelen tener un valor calorífico más alto que los residuos sólidos municipales, con una WtE que varía de 750 a 1000 kWh por tonelada de residuos incinerados [105], que de utilizarse de forma rutinaria para aprovechamiento energético mitigaría de forma notable la huella de carbono total.

Las actividades de reprocesamiento tampoco están exentas de emisiones extra de huella de carbono. Si damos una visión más holística de lo que supone el reprocesamiento, debemos admitir que requieren la presencia de personal auxiliar formado, y si se requiere contratar profesionales técnicos adicionales para reprocesar los DR, deberíamos añadir emisiones al cómputo global. Si asumiéramos la contratación de un profesional con un viaje promedio diario de ida y vuelta de 4 km en transporte unipersonal que consuma combustible fósil, deberíamos añadir unas emisiones extra de 200 kgCO₂-eq [189]. En

6. DISCUSIÓN

hospitales donde se realiza un bajo volumen de CPRE (por ejemplo, menos de 40 casos al año), la estrategia desecharle podría estar algo más justificada. Si tenemos en cuenta la producción, el transporte y 40 ciclos de reprocesamiento de un DR, junto con el desplazamiento diario de un empleado extra al centro sanitario, las emisiones globales supondrían 227,2 kgCO₂-eq durante un año. En cambio, si en ese centro hospitalario realizáramos las 40 CPRE con un DD-B, la producción, el transporte y la incineración de 40 DD-B representarían 262,8 kgCO₂-eq. Incluso, si a través de la empresa fabricante, pudiéramos implementar estrategias sostenibles para aprovechamiento energético de la incineración, como WtE, produciríamos energía que ahorraría unas emisiones de carbono equivalentes a 5,5 kgCO₂-eq. En este escenario, ambas estrategias, reutilizable y de un solo uso, serían comparables. Es más, si aplicamos los resultados de una encuesta reciente en prácticas de sostenibilidad en endoscopia digestiva, el desplazamiento de profesionales constituye la fuente de emisiones más relevante. Según esta encuesta, los trabajadores sanitarios se desplazaban de media unos 40 km diarios para ir y venir de su centro de trabajo [75]. Por lo que contratar un técnico auxiliar adicional destinado al reprocesamiento de duodenoscopios en estas condiciones supondría unos 2400 kgCO₂-eq extra anuales. Es cierto que la mayoría de unidades de endoscopia ya cuenta con entre 2 o 3 profesionales destinados a esta labor y que el volumen de CPRE no requeriría la contratación de más profesionales. Pero si tenemos en cuenta otro tipo de centros especializados, donde no existen unidades de endoscopia y no se cubren todas las áreas clínicas, como aquellos centros especializados en cirugía u oncología, constituye una importante ventaja la posibilidad de realizarlas mediante DD y desechar el dispositivo posteriormente. Esto es debido a que si se realiza un bajo volumen de CPRE, se ahorra en la inversión de las máquinas especializadas en reprocesamiento, y se evita la contratación y desplazamiento de personal auxiliar dedicado a esta labor.

Si bien, si planteáramos este escenario de economía lineal con consumo universal de DD conllevaría ciertas desventajas, por tres motivos. En primer lugar, la mayoría de centros con la CPRE en su cartera de servicios, realizan un alto volumen de endoscopias convencionales, como gastroscopias y colonoscopias, que ya requieren una instalación, mantenimiento y profesionales encargados de máquinas de reprocesamiento, por lo que no sería necesario probablemente contratar más personal. En segundo lugar, según las guías y recomendaciones de expertos, por la considerable tasa de efectos adversos derivados de la

CPRE, la realización de esta técnica debería limitarse a centros de alto volumen para que los profesionales puedan mantenerse técnicamente actualizados, ya que está demostrado que existen mejores tasas de éxito y menores efectos adversos en estos casos [190]. Y, en tercer lugar, estas estimaciones están realizadas a un año, cuando es bien conocido que los DR pueden funcionar adecuadamente durante al menos 8-10 años.

El Grupo de Trabajo de *Green endoscopy* de la ESGE ha propuesto varias estrategias para mejorar la sostenibilidad sin comprometer la atención al paciente, haciendo hincapié en el uso estricto de DD para indicaciones seleccionadas [48]. El total de residuos y la huella de carbono de un procedimiento de endoscopia ambulatoria se ha estimado previamente, con residuos globales de 0,5–2,1 kg por endoscopia [26, 28, 33] y 28,4 kgCO₂-eq en términos de huella de carbono [44]. Además, según estimaciones recientes, probablemente aumentaría el 40 % de los residuos si utilizáramos universalmente los endoscopios de un solo uso [33].

Según el trabajo de Lacroute *et al*, el desplazamiento de pacientes y profesionales fue la principal fuente de emisiones (45 %), seguido del equipamiento médico, consumo de energía y el material fungible. Para nuestra sorpresa, el material fungible ocupó el cuarto lugar, con un 7 % de la huella de carbono total [44]. Si bien, los autores admiten que esta baja contribución puede estar motivada porque el análisis se realiza en un centro de endoscopia ambulatoria, donde existe una tasa muy baja procedimientos terapéuticos que requieran dispositivos de uso médico desechables. Además, en este centro está estandarizado el uso de material reutilizable, como EPI, abreboticas y dispositivos de anestesia. Por último, reconocen una limitación importante de la estimación del impacto medioambiental del material fungible. Esto es debido a que no realizaron estudios de la composición estructural, y estimaron las emisiones de carbono en función del probable “material más abundante” que pudiera presentar el accesorio de endoscopia. De ahí la importancia de generar nueva evidencia científica en base a la composición estructural del material fungible y su análisis de ciclo de vida para estimar finalmente la huella de carbono asociada a la endoscopia digestiva.

En el trabajo citado previamente, una endoscopia ambulatoria genera unos 1,5 kg de residuos promedio [44]. Sin embargo, según los datos de nuestro trabajo, para una CPRE estándar por coledocolitiasis realizada con DD, con el uso de al menos un balón de Fogarty y un esfinterotomo, si tenemos en cuenta que por sus características tendrán un peso similar

6. DISCUSIÓN

a un hemoclip (aproximadamente 60 g), los residuos únicamente derivados del material fungible endoscópico ascenderían a 1,06 kg por endoscopia. Asimismo, en nuestro estudio, la estrategia de CPRE con DD generaría 4,71 (DD-A) vs. 3,57 (DD-B) kg de RBM por semana. Debido al protocolo gestión de residuos asociada a los RBM, este hecho supondría que casi 5 kg de plástico deban ser incinerados cada semana, lo cual supone una importante preocupación ambiental.

Existe escasa evidencia en la literatura sobre la recomendación a favor o en contra del uso de DD. Uno de los principales argumentos a favor de los DD es proteger la salud del paciente minimizando el riesgo de infecciones por contaminación cruzada. Los DR pueden tener fallos en los procesos de desinfección y reprocesamiento, lo que supone un riesgo para los pacientes que se realizan la CPRE con ese DR contaminado posteriormente. En este sentido, se han propuesto métodos de vigilancia epidemiológica y reprocesamiento mejorados, pero no han demostrado de forma consistente su superioridad sobre la desinfección de alto nivel estándar [191, 192]. Además, la implementación de estos métodos de reprocesamiento mejorados aumenta significativamente los gastos operativos con un impacto económico considerable, ya que el reprocesamiento doble, los cultivos de vigilancia asociados y la esterilización con óxido de etileno aumentan el coste operativo en un 47 %, 160 % y 270 %, respectivamente [193]. Otro inconveniente de las técnicas de reprocesamiento mejoradas es el tiempo de inactividad adicional del endoscopio, que obliga a multiplicar varias veces el número de endoscopios necesarios para mantener el volumen de procedimientos, lo que aumenta aún más los costes. En consecuencia, la mayoría de los profesionales sanitarios opina que los esfuerzos a largo plazo deben ir dirigidos a mejorar el diseño del duodenoscopio y mejorar las técnicas de reprocesamiento [194].

En cambio, si bien el mayor argumento a favor del uso de DD es su impacto potencial en la reducción de las infecciones por contaminación cruzada, faltan pruebas sustanciales que lo confirmen. Es importante tener en cuenta que la mera colonización de los endoscopios no se traduce necesariamente en una infección clínicamente relevante. Aunque múltiples estudios han informado de la viabilidad y seguridad de la realización de CPRE utilizando DD [185, 186], no existe ningún ensayo aleatorizado que compare el riesgo de infección entre los dos tipos de duodenoscopios. Además, la realización de un estudio de este tipo puede ser poco realista, ya que requeriría una muestra de gran tamaño

(más de 5000 pacientes) debido al bajo riesgo de transmisión de infecciones con los DR (0,4 % a 1 %) [185]. Al estar esterilizados y utilizarse en una sola ocasión, se ha estipulado que los DD tienen el potencial de eliminar todas las infecciones asociadas con los duodenoscopios (DAI, del inglés *duodenoscope associated infection*). Estas infecciones las consideraríamos exógenas, ya que están causadas por microorganismos están fuera del paciente antes de comenzar el procedimiento. Sin embargo, se puede cuestionar la capacidad de los DD para prevenir infecciones endógenas, que están causadas por la translocación de microorganismos desde la propia flora intestinal del paciente al interior de la vía biliar y al torrente sanguíneo. Este tipo de infecciones endógenas, son prácticamente inevitables y suponen un riesgo inherente de todos los procedimientos endoscópicos. En el trabajo de Bruno *et al* [195], el estudio de viabilidad de los DD con mayor cohorte de pacientes, se analizaron los eventos adversos relacionados con la CPRE mediante DD, y detectaron una tasa de infección global del 1,63 %. A pesar de usar DD, curiosamente detectaron una tasa de infección muy similar al análisis clásico de eventos adversos en CPRE realizado por Andriulli *et al* con 16.855 pacientes (1,44 %) [177]. Estas tasas de infección similares permiten cuestionar la efectividad de los DD de realmente disminuir los efectos adversos globales de tipo infeccioso. Estos resultados indican que la infección endógena aún puede ocurrir con el uso de un DD, por lo que no se garantiza que la tasa de infección relacionada con el procedimiento sea más baja que la tasa para los DR. A pesar de todo, la posibilidad de distinguir entre infección endógena y exógena resulta prácticamente imposible. Es lógico pensar, que realizar CPRE con DD debería reducir la tasa total de infecciones, a expensas de reducir las DAI. Cuando ocurre una infección de este tipo, estos pacientes requieren hospitalización, extracciones sanguíneas, pruebas radiológicas, cultivos bacteriológicos, y tratamiento antibiótico. En algunos casos, incluso podrían necesitar estancias en unidades de medicina intensiva. Todo esto no es despreciable y también tiene un impacto ambiental relevante, por lo que el objetivo debe centrarse en disminuir en medida de lo posible este tipo de infecciones.

Otros problemas asociados a los DD son su elevado coste, que ya hemos tratado en la discusión, y su impacto negativo medioambiental. La estrategia desecharable confirma una apuesta por la economía lineal dejando de lado estrategias que mejoren la sostenibilidad y la economía circular. Es necesario un cambio de mentalidad durante el desarrollo de nueva tecnología, centrando esfuerzos en estudiar el impacto medioambiental

6. DISCUSIÓN

al mismo tiempo que evaluamos la funcionalidad técnica y el coste económico [196]. Más allá del coste unitario de los DD, la sostenibilidad económica engloba el concepto de crecimiento económico sin efectos negativos sobre el medio ambiente y la sociedad [187]. Los DD van en contra de uno de los pilares fundamentales de la sostenibilidad, la posibilidad de reutilizar [197]. No todas las infecciones cruzadas están relacionadas con endoscopios contaminados y la contaminación del endoscopio en sí no equivale a una infección cruzada [175].

El precio de reducir a cero la transmisión de infecciones tiene que estar equilibrado al coste para la salud humana global y la salud de los ecosistemas. La decisión de usar DD no debería basarse únicamente en el rendimiento técnico, sino que también debe considerar su impacto en un entorno real. Dado que conllevan un esfuerzo financiero considerable, presentan un impacto medioambiental negativo, y no hay datos claros de que puedan reducir el riesgo de infección cruzada, probablemente sea prematuro reemplazar el uso de los DR en este momento. Por el momento, mientras se genera más evidencia de su impacto global, la conducta más responsable sería utilizar DD en casos seleccionados de alto riesgo de infección [172].

Los nuevos diseños de duodenoscopios con el extremo distal desechable pueden constituir una solución intermedia al disminuir notablemente la transmisión infecciones con un impacto medioambiental y económico mucho más favorable que el uso de DD. Un ensayo clínico demostró que los duodenoscopios con capuchones distales desechables presentaron, de forma significativa, una menor contaminación de bacterias y residuos orgánicos que los DR estándar [198]. En otro estudio multicéntrico, los DR estándar presentaron una contaminación microbiana persistente de un 11,2 %, mientras que esta tasa se redujo al 3,8 % en el caso de duodenoscopios con capuchones distales desechables. Al evaluar técnicamente ambos endoscopios, no se encontraron diferencias en el éxito técnico para completar una CPRE [199]. Si bien se postulan como la mejor solución para encontrar un equilibrio entre el impacto medioambiental y económico, respecto del riesgo de transmisión de infecciones, son necesarios más estudios de práctica clínica real y ensayos aleatorizados para recomendar su uso de forma sistemática [172].

Además de los duodenoscopios de un solo uso, la industria ha ido posteriormente más allá, y ha desarrollado gastroscopios y colonoscopios de un solo uso. A diferencia de los DD, la evidencia científica que evalúa y compara a estos dispositivos con los

tradicionales reutilizables es muy escasa [200, 201]. Los prototipos iniciales eran coberturas desechables que envainaban por completo el endoscopio, y se desecharan al final del procedimiento [202]. Como ventajas, los propulsores destacaban mejorías en la eficiencia y la seguridad, ya que presentaban una menor espera entre procedimientos, al no ser necesario el reprocesamiento del endoscopio. También ensalzaron su uso lejos de las máquinas de desinfección de endoscopios, como situaciones de emergencia fuera de la unidad de endoscopia y en clínicas o centros médicos de menor tamaño que no disponen de sistemas de desinfección y reprocesamiento.

Un estudio reciente comparó los resultados de la gastroscopia utilizando un nuevo endoscopio desechable (PR-JPD-002, *Shenzhen PengRui Intelligent Image Co., Ltd.*) con endoscopios convencionales. Aunque la duración del procedimiento fue mayor en el grupo desechable, otros parámetros, incluida la calidad de la imagen, la maniobrabilidad y los eventos adversos, fueron similares en ambos grupos [201]. En cambio, en otros estudios sí se han planteado preocupaciones sobre la calidad de la imagen con los nuevos gastroscopios desechables [200]. El primer gastroscopio desechable que fue comercializado en Europa en abril de 2022 fue *Ambu aScope Gastro* (Ambu Ballerup, Dinamarca). Se han realizado estudios de viabilidad técnica y capacidades, como en situaciones de sospecha de hemorragia digestiva [203] y en intervenciones como disección submucosa endoscópica [204]. Para fomentar su uso, los fabricantes señalan las altas tasas de contaminación de los gastroscopios, que según un estudio retrospectivo podrían oscilar entre el 11,2 y el 22,8 % [205]. Otro metaanálisis que evalúa la tasa de contaminación de todos los tipos de endoscopios, advierte de una tasa del 6 % en los EEUU y del 18,16 % en Europa [206]. Si bien la contaminación no es indicativa de infección, sí se han detectado brotes infecciosos que podrían estar asociados a endoscopios contaminados. Cuando ocurren, estas infecciones pueden tener tasas de mortalidad relativamente elevadas, del 6,3 % para gastroscopia, 12,7 % para CPRE y el 10 % para colonoscopia [207].

Los endoscopios desechables se presentan como una alternativa a los endoscopios reutilizables con las posibles ventajas de no invertir en la tecnología necesaria para su reprocesamiento, no tener que esperar a los ciclos de desinfección y continuar trabajando, teóricos coste económico más bajo y teórica ausencia de infecciones por contaminación cruzada [208]. Con una seguridad y rendimiento técnico similares a los endoscopios reutilizables, los endoscopios desechables pueden ser utilizados en entornos seleccionados.

6. DISCUSIÓN

Se está promoviendo su uso en lugares fuera de la unidad de endoscopia, como en situaciones de urgencia, en unidades de críticos y, sobre todo, en endoscopia intraoperatoria [209]. Para servicios de cirugía digestiva, en las intervenciones de cirugía esofagogastrica y bariátrica aporta muchas ventajas desde el punto de vista técnico, para comprobación del resultado final tras confeccionar la anastomosis [210]. Estas cirugías son mucho menos frecuentes que el global de exploraciones endoscópicas, por lo que es una importante ventaja no tener que adquirir la tecnología necesaria para la desinfección y el reprocesamiento de endoscopios. Además, en este entorno, es un punto muy favorable poder utilizar un endoscopio nuevo y estéril en situación completa de asepsia.

También ha sido aprobado recientemente en EEUU, aunque aún no en Europa, un colonoscopio desecharable (*Ambu aScope Colon*). Hay que destacar que aún no está claro el verdadero impacto de los colonoscopios desecharables en las tasas de infección y complicaciones, así como la rentabilidad y la funcionalidad para procedimientos terapéuticos más complejos [211]. El coste por procedimiento utilizando colonoscopios reutilizables estándar depende en gran medida del país de origen, los métodos de reprocesamiento, del número de colonoscopios y el número de procedimientos realizados anualmente. Se ha estimado que en centro de alto volumen (unos 3000 procedimientos anuales), estaría en torno a unos 188,64 dólares por colonoscopia, frente a los 501,16 dólares en centros de menor volumen (1000 procedimientos anuales) [211]. En instalaciones con bajo volumen de pacientes y alto riesgo de infección, los colonoscopios desecharables podrían reducir la transmisión de infecciones relacionadas con el dispositivo y demostrar ser rentables. Sin embargo, esto debe demostrarse de forma fehaciente mediante ensayos clínicos aleatorizados, y pese a que sean más rentables y consigan reducir mínimamente la tasa de infección, debemos considerar el efecto global en el impacto medioambiental que supondría la adopción global de colonoscopios desecharables, al difundir una estrategia de economía lineal donde el consumo de recursos y las emisiones atmosféricas se verían aumentadas de forma exponencial. Hasta que no se evalúen los impactos económicos y ambientales, no se puede recomendar su uso rutinario. La investigación futura debería ir dirigida a evaluar y comparar la sostenibilidad (financiera y ambiental) de los diferentes sistemas de endoscopios desecharables respecto a los endoscopios reutilizables clásicos [172].

La evidencia científica disponible en la literatura acerca de ACV globales que comparan los DR y DD en términos de sostenibilidad es muy escasa. Le NNT, *et al.* [108] diseñaron un estudio medioambiental, basado en estimaciones, cuyos resultados mostraron que los DR generan emisiones de GEI significativamente más altas (de 36,3 a 71,5 kgCO₂-eq por duodenoscopio) en comparación con la proporción de emisiones que se le puede asignar a un DR por procedimiento (1,53 kgCO₂-eq). Estos resultados presentan grandes diferencias respecto a nuestro trabajo. En primer lugar, las cifras tan elevadas de emisiones de los DD son debidas sobre todo al proceso de fabricación, que en sus análisis supuso más del 90 %. Para determinar las emisiones derivadas del proceso de producción, tomaron como referencia la composición de un ureteroscopio reutilizable (90 % de plástico, 4 % de acero, 4 % de electrónica y 2 % de goma) para compararlo con el DR. Mientras tanto, para los DD supusieron una composición similar simplemente con menos peso y menor cantidad de componentes electrónicos. Como no tenían datos de la composición, utilizaron un modelo para proporcionar escenarios ambientales con límites superiores a inferiores. Esta estimación resalta la importancia del análisis de la composición en los estudios de ACV, para poder determinar de forma fehaciente los componentes estructurales de los dispositivos, ya que las emisiones derivadas de la producción de éstos varían sustancialmente dependiendo de las materias primas que se empleen y su proceso de fabricación. En nuestro trabajo, realizamos un análisis integral con mediciones detalladas de peso y técnicas de laboratorio para determinar con precisión la composición material, mostrando diferencias significativas: frente a este ureteroscopio reutilizable (4 % de acero), el contenido de metales del DD-A fue del 30 % y del DD-B del 18 %, en contraposición al 95 % en el caso del DR. Además, asumieron el cloruro de polivinilo (PVC) como principal componente (90 %) tanto del reutilizable como del desechable, mientras que este polímero no se detectó en ninguno de los endoscopios en nuestro análisis de laboratorio. Las diferencias tan significativas de los resultados ambientales de la fabricación entre nuestro trabajo y el suyo podrían tener su origen en las diferencias sustanciales en la composición material. Si bien, no debemos dejar de resaltar que las diferencias podrían venir también de la exclusión en nuestro ACV de las emisiones derivadas de las etapas de ensamblaje y moldeo por inyección de polímeros en el proceso de fabricación. En nuestro caso, no encontramos bases de datos que tengan en cuenta estas etapas, y, además, asumimos que serían similares entre los distintos tipos de duodenoscopios. Asimismo, en su trabajo no reflejan claramente como obtienen las emisiones derivadas de la gestión de residuos de los

6. DISCUSIÓN

DD, ni tampoco si asumen la incineración a alta temperatura como modelo de disposición final. En este sentido, reflejan unas emisiones derivadas de la gestión de residuos que no llegan al 5 % del total del ACV, mientras que en nuestro caso se sitúan cerca del 45 %. Más aún, en nuestro caso no tuvimos en cuenta el impacto ambiental del consumo energético de los procesadores durante la endoscopia, bajo la premisa de que asumimos que sería similar en ambos grupos desechable y reutilizable. En el estudio de Le NNT *et al*, el consumo energético del reprocesador supuso el 62 % de las emisiones en el grupo de los DR, lo que podría explicar la amplia diferencia respecto a nuestros resultados de emisiones derivadas de los DR. No obstante, nuestro trabajo sí tuvo en cuenta el consumo energético del reprocesamiento, ya que es un impacto ambiental adicional de los DR que no ha lugar en los DD. En resumen, presentamos un ACV más riguroso y preciso, destacando la importancia del análisis de la composición material. En cualquier caso, ambos trabajos destacan las diferencias medioambientales que conllevaría el uso de universal de DD para los procedimientos de CPRE, lo que obliga a los fabricantes a optimizar sus procesos de producción y a proporcionar soluciones de gestión de residuos, que puedan incluir alternativas como nuevos programas de reciclaje o el diseño de alternativas parcialmente reciclables.

A pesar de que la composición material se ha determinado en detalle, nuestro trabajo identificó ciertas limitaciones para cuantificar los impactos ambientales: i) Debido a la dificultad de acceder a bases de datos del ACV que contenga información sobre el impacto de la incineración a alta temperatura, la estimación de las emisiones de la gestión de residuos de los dispositivos se realizó a partir de referencias bibliográficas [16, 26, 74]; ii) No incluimos las emisiones derivadas del transporte de materias primas desde su extracción hasta las instalaciones de fabricación, o del transporte de los RBM desde el hospital hasta los incineradores. Dentro del transporte desde el lugar de fabricación hasta el hospital, despreciamos también las emisiones derivadas del traslado de los dispositivos desde el puerto de Valencia hasta el hospital; iii) Algunas de las etapas de la producción, véase el ensamblaje y el moldeo por inyección de polímeros, no se incluyeron en el análisis, por lo que el proceso de fabricación podría aumentar ligeramente los valores de huella de carbono, aunque de forma similar en ambos grupos; iv) Los DR muestran una tasa de infección baja pero significativa, que podría oscilar entre el 0,4 y el 1 % [185]. En nuestro trabajo no realizamos un análisis de sensibilidad que tuviera en cuenta el aumento del

impacto medioambiental que supondría la aparición de infecciones asociadas a los DR. Si bien es prácticamente imposible discriminar entre las infecciones intrínsecamente asociadas a un duodenoscopio contaminado y las infecciones endógenas, es lógico anticipar que los DD reducirían la tasa de infección general; v) Otras fuentes de emisiones, como el consumo eléctrico de los procesadores de endoscopia durante la CPRE no se estimó en ninguno de los grupos, al asumir que sería similar en ambos y no supone un cambio en las diferencias entre la estrategia desechable y reutilizable. Si consideramos que la energía utilizada para los DD y los DR es similar (unos 1,23 kWh por procedimiento [108]), aumentarían las emisiones en ambos grupos aproximadamente 0,07 kgCO₂-eq por CPRE [44].

Los hallazgos de este estudio resaltan la importancia de tener en cuenta todas las variables a la hora de cuantificar el impacto económico y medioambiental de los DD: i) La tasa de contaminación de duodenoscopios y de infección clínicamente significativa, ii) el coste de los dispositivos y de su reprocesamiento, iii) el impacto clínico favorable de la implantación de los DD y su capacidad para conseguir tasas de éxito técnico similares a los tradicionales, y por último, iv) el análisis de la composición estructural de los duodenoscopios y su impacto medioambiental en términos de huella de carbono, con la posibilidad de discriminar su compra entre fabricantes (*green purchasing*). Todas estas variables son clave y deben ser incluidas en los estudios futuros que evalúen la sostenibilidad en endoscopia digestiva.

6.3 Interés científico de la tesis doctoral

Los resultados de este trabajo tienen gran interés científico ya que representan uno de los primeros estudios de sostenibilidad en nuestra especialidad. El estudio de la repercusión medioambiental de los sistemas sanitarios está en auge, ya que contribuyen en un 5 % al global de emisiones de GEI a nivel mundial, por lo que nuestra actividad, que en principio fomenta la prevención en salud, por contrapartida está generando efectos tóxicos sobre nuestros ecosistemas y el ser humano. Concretamente la endoscopia digestiva, al ser una especialidad con alto número de procedimientos, conlleva un elevado consumo de recursos y genera gran cantidad de residuos, situándose en tercer lugar en producción de

6. DISCUSIÓN

desechos, sólo detrás de grandes unidades como el bloque de quirófano y las unidades de críticos.

Recientemente, todas las disciplinas médicas se suman al desarrollo de la investigación en la huella de carbono de su práctica clínica habitual, y en nuestra especialidad, el campo de investigación *green endoscopy* ha irrumpido y está generando publicaciones en revistas científicas de gran importancia internacional. En este trabajo, se han citado las publicaciones de muy alto impacto generadas por nuestro equipo multidisciplinar de ingenieros y médicos, tanto para el análisis pormenorizado de la composición estructural y huella de carbono de los accesorios de uso endoscópico [139], así como del impacto medioambiental de las intervenciones de sostenibilidad sobre estos accesorios en la práctica clínica [147]. Las publicaciones en referencia al análisis estructural y medioambiental de los duodenoscopios también están terminadas y enviadas a una revista de alto impacto en endoscopia digestiva, en vías de aceptación antes de la revisión final.

Nuestras investigaciones en sostenibilidad durante este período de tesis doctoral han generado 2 trabajos escogidos para exposición oral en dos congresos consecutivos de la Sociedad Española de Endoscopia Digestiva (SEED), otros 2 trabajos escogidos para exposición oral en el congreso europeo de la ESGE, así como numerosos trabajos en modelo póster. Nuestros proyectos de investigación han sido evaluados positivamente en ambas reuniones, y obtuvimos premios a proyectos de investigación tanto en la reunión de la SEED como de la ESGE, consiguiendo una financiación para el proyecto que asciende a 25.000 €. En último lugar, fuimos galardonados con el “Premio a la innovación del año” por la ESGE, gracias a la idea de intervención en sostenibilidad *green mark*.

Este estudio abre las puertas de una nueva línea de investigación de sostenibilidad en endoscopia digestiva. Sus resultados sirven para determinar la magnitud del problema de los dispositivos médicos de un solo uso en términos de impacto medioambiental, nos permiten crear conciencia en nuestro entorno científico y sienta las bases de protocolos de sostenibilidad para implementar en las unidades de endoscopia digestiva. La innovación en nuestro proyecto es la caracterización completa de los materiales para conocer su composición exacta y así determinar la huella de carbono según los estándares de calidad en el estudio del ACV, de la forma más fiable posible. Además, el hecho de comparar la huella de carbono de diferentes casas comerciales, hace que podamos aplicar, por primera

vez en endoscopia digestiva, el concepto de *green purchasing*, tan de moda en otros medios industriales, como puede ser la industria textil o alimentaria. De este modo, es notable la traslacionalidad de estos resultados a la práctica clínica, ya que, desde el punto de vista de gestión clínica, podemos optimizar nuestras decisiones para adquisición de dispositivos endoscópicos. Por primera vez, estas decisiones no solo están basadas en la funcionalidad técnica y precio del dispositivo, sino del impacto medioambiental que este produce.

En conclusión, nuestro trabajo destaca que el conocimiento de la composición material del equipo endoscópico es clave para realizar un estudio adecuado del ACV y para seleccionar las alternativas más sostenibles. Nuestros hallazgos indican que el uso universal de endoscopios desechables tendría un impacto medioambiental difícilmente justificable, sobre todo en los centros con alto volumen de procedimientos. Por lo tanto, debemos optimizar los procesos de desinfección y reprocesamiento de los duodenoscopios reutilizables para minimizar eficazmente la infección asociada a los mismos sin comprometer la salud ambiental. Además, estos resultados permiten sentar las bases que permitan explorar soluciones innovadoras para disminuir la extracción de materias primas o la producción de residuos, involucrando el uso de componentes desechables o dispositivos parcialmente reciclables. De esta manera, podremos lograr un equilibrio entre la seguridad del paciente y la responsabilidad ambiental, contribuyendo en última instancia a prácticas de atención sanitaria en donde la sostenibilidad es una pieza clave de la gestión clínica y la calidad asistencial.

7. CONCLUSIONES FINALES

7. CONCLUSIONES FINALES

- I. Mediante técnicas de análisis instrumental podemos determinar de forma fidedigna la composición estructural de los dispositivos en endoscopia digestiva, lo que supone un paso crucial para estimar adecuadamente el impacto medioambiental.
- II. El peso y la composición de los accesorios endoscópicos varía sustancialmente entre casas comerciales. Las diferencias de peso llegaron hasta el 62%, y algunas casas utilizaron polímeros menos sostenibles en el proceso de fabricación, lo que puede suponer incrementos de las emisiones contaminantes de hasta un 55% más.
- III. Existen diferencias significativas ($p<0,001$) en la huella de carbono entre los accesorios endoscópicos de las diferentes casas comerciales, de hasta el 48 % entre pinzas de biopsia y hasta el 39 % entre clips. Estos resultados resaltan la posibilidad de elegir y realizar una “compra sostenible” entre los diferentes accesorios.
- IV. Nuestra propuesta de sostenibilidad “green mark” evitaría incinerar hasta el 60 % del peso de los accesorios y reduciría la huella de carbono en aproximadamente un 35 %. El estudio de intervención redujo hasta el 27 % la huella de carbono, y aplicado de forma mantenida disminuiría el impacto medioambiental de forma relevante. Esta innovación sienta las bases del diseño de dispositivos parcialmente reciclables.
- V. Los duodenoscopios desechables son tres veces más ligeros que el reutilizable, pero están compuestos fundamentalmente por polímeros plásticos con alto potencial climático.
- VI. El duodenoscopio desechable A produce hasta un 21,5 % más de emisiones que el duodenoscopio desechable B en cada ciclo de vida, lo que también abre las puertas a la “compra sostenible” entre duodenoscopios.
- VII. El uso universal de duodenoscopios desechables durante el tiempo de vida útil del duodenoscopio reutilizable resulta hasta 82 veces más contaminante, y estas diferencias en emisiones equivalen a climatizar una vivienda durante 3 años.
- VIII. El reprocesamiento de toda la vida útil del duodenoscopio reutilizable equivale, en términos medioambientales, a la incineración de apenas 30 duodenoscopios desechables. El teórico riesgo de infección evitado con los duodenoscopios desechables no justifica el impacto medioambiental de su uso universal.

- IX. Los resultados de esta tesis y de los trabajos derivados de ella deberían promover que las sociedades de endoscopia digestiva presionen a las administraciones y a los fabricantes de material endoscópico para que suministren los datos de su impacto ambiental y, en su defecto, de la composición de sus materiales. Asimismo, sienta las bases de la innovación y desarrollo de dispositivos endoscópicos con principios de sostenibilidad, como dispositivos reutilizables y parcialmente desechables.

8. BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shahbaz M, Mallick H, Mahalik MK et al. Does globalization impede environmental quality in India? *Ecol Indic* 2015; 52: 379-393.
- [2] Gökmüş K, Taspinar N. The relationship between CO₂ emissions, energy consumption, economic growth and FDI: the case of Turkey. *J Int Trade Econ Dev* 2016; 25: 706-723.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2021: The physical science basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available from: <http://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm>. Accessed: December 2023
- [4] UN Environment Programme. Cut global emissions by 7.6 percent every year for next decade to meet 1.5°C Paris target - UN report. Available from: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/cut-global-emissions-76-percent-every-year-next-decade-meet-15degc>. Accessed: December 2023
- [5] <https://www.lancetcountdown.org/responding-to-the-health-risks-of-climate-change-in-europe/>. Responding to the health risks of climate change in Europe. Lancet Countdown on Health and Climate Change. Available from: <https://www.lancetcountdown.org/responding-to-the-health-risks-of-climate-change-in-europe/>. Accessed:
- [6] Siau K, Hayee BH, Gayam S. Endoscopy's Current Carbon Footprint. *Tech Innov Gastrointest Endosc* 2021; 23: 344-352.
- [7] Pichler P-P, Jaccard IS, Weisz U et al. International comparison of health care carbon footprints. *Environ Res Lett* 2019; 14: 064004.
- [8] Tennison I, Roschnik S, Ashby B et al. Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England. *Lancet Planet Health* 2021; 5: e84-e92.
- [9] Eckelman MJ, Sherman J. Environmental Impacts of the U.S. Health Care System and Effects on Public Health. *PLoS One* 2016; 11: e0157014.
- [10] Chung JW, Meltzer DO. Estimate of the carbon footprint of the US health care sector. *Jama* 2009; 302: 1970-1972.
- [11] Malik A, Lenzen M, McAlister S et al. The carbon footprint of Australian health care. *Lancet Planet Health* 2018; 2: e27-e35.
- [12] Wu R. The carbon footprint of the Chinese health-care system: an environmentally extended input-output and structural path analysis study. *Lancet Planet Health* 2019; 3: e413-e419.
- [13] Nansai K, Fry J, Malik A et al. Carbon footprint of Japanese health care services from 2011 to 2015. *Resour Conserv Recycl* 2020; 152: 104525.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [14] Sherman JD, MacNeill A, Thiel C. Reducing Pollution From the Health Care Industry. *Jama* 2019; 322: 1043-1044.
- [15] Tomson C. Reducing the carbon footprint of hospital-based care. *Future Hosp J* 2015; 2: 57-62.
- [16] Rizan C, Bhutta MF, Reed M et al. The carbon footprint of waste streams in a UK hospital. *J Clean Prod* 2021; 286: 125446.
- [17] Ebi KL, Boyer C, Bowen KJ et al. Monitoring and Evaluation Indicators for Climate Change-Related Health Impacts, Risks, Adaptation, and Resilience. *Int J Environ Res Public Health* 2018; 15.
- [18] Booth A. Carbon footprint modelling of national health systems: Opportunities, challenges and recommendations. *Int J Health Plann Manage* 2022; 37: 1885-1893.
- [19] Murray A, Skene K, Haynes K. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *J Bus Ethics* 2017; 140: 369-380.
- [20] Minogue V, Wells B. Reducing waste in the NHS: an overview of the literature and challenges for the nursing profession. *Nurs Manag (Harrow)* 2016; 23: 20-25.
- [21] Rizan C, Reed M, Bhutta MF. Environmental impact of personal protective equipment distributed for use by health and social care services in England in the first six months of the COVID-19 pandemic. *J Roy Soc Med* 2021; 114: 250-263.
- [22] Ray RL, Singh VP, Singh SK et al. What is the impact of COVID-19 pandemic on global carbon emissions? *Sci Total Environ* 2022; 816: 151503.
- [23] Patrício Silva AL, Prata JC, Walker TR et al. Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. *Chem Eng J* 2021; 405: 126683.
- [24] Montoto-Martínez T, De la Fuente J, Puig-Lozano R et al. Microplastics, bisphenols, phthalates and pesticides in odontocete species in the Macaronesian Region (Eastern North Atlantic). *Mar Pollut Bull* 2021; 173: 113105.
- [25] Fountzas M, Nikolaou C, Schizas D et al. Personal protective equipment against COVID-19: Vital for surgeons, harmful for patients? *Am J Surg* 2021; 221: 772-774.
- [26] Cunha Neves JA, Roseira J, Queirós P et al. Targeted intervention to achieve waste reduction in gastrointestinal endoscopy. *Gut* 2022.
- [27] Vaccari M, Tudor T, Perteghella A. Costs associated with the management of waste from healthcare facilities: An analysis at national and site level. *Waste Manag Res* 2018; 36: 39-47.
- [28] Gayam S. Environmental Impact of Endoscopy: "Scope" of the Problem. *Am J Gastroenterol* 2020; 115: 1931-1932.
- [29] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Nota Técnica Prevención 372: Tratamiento residuos sanitarios. Available from: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2013-02-18-4-TRATAMIENTO%20DE%20RESIDUOS%20SANITARIOS.pdf>. Accessed: December 2023

- [30] Heera S, Kunal, Rajor A. Bacterial Treatment and Metal Characterization of Biomedical Waste Ash. *J Waste Manag* 2014; 2014: 956316.
- [31] Damgaard A. Waste to energy the carbon perspective. *Waste Manag Res* 2015; January-february: 24-28.
- [32] Siddhi S, Dhar A, Sebastian S. Best Practices in Environmental Advocacy and Research in Endoscopy. *Tech Innov Gastrointest Endosc* 2021; 23: 376-384.
- [33] Namburar S, von Renteln D, Damianos J et al. Estimating the environmental impact of disposable endoscopic equipment and endoscopes. *Gut* 2022; 71: 1326.
- [34] Peery AF, Crockett SD, Murphy CC et al. Burden and Cost of Gastrointestinal, Liver, and Pancreatic Diseases in the United States: Update 2021. *Gastroenterology* 2022; 162: 621-644.
- [35] Peery AF, Crockett SD, Murphy CC et al. Burden and Cost of Gastrointestinal, Liver, and Pancreatic Diseases in the United States: Update 2018. *Gastroenterology* 2019; 156: 254-272.e211.
- [36] Grand View Research, Inc. Endoscopes market share & growth report, 2021-2028. Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/endoscopy-operative-devices-market-report>. Accessed: January 2024
- [37] Ravindran S, Bassett P, Shaw T et al. National census of UK endoscopy services in 2019. *Frontline Gastroenterol* 2021; 12: 451-460.
- [38] The Lancet Gastroenterology H. USPSTF recommends expansion of colorectal cancer screening. *Lancet Gastroenterol Hepatol* 2021; 6: 1.
- [39] Santolaria S, Ducons J, Maria Bordas J. Limpieza y desinfección en endoscopia digestiva. *Grastroenc Hepat-Barc* 2007; 30: 25-35.
- [40] Thiel CL, Woods NC, Bilec MM. Strategies to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Laparoscopic Surgery. *Am J Public Health* 2018; 108: S158-s164.
- [41] Siau K, Beintaris I. My approach to water-assisted colonoscopy. *Frontline Gastroenterol* 2019; 10: 194-197.
- [42] Carbon Literacy Project, Walkley S. The carbon cost of an email: Update! Available from: <https://carbonliteracy.com/the-carbon-cost-of-an-email/>. Accessed: December 2023
- [43] Andrae ASG, Edler T. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges* 2015; 6: 117-157.
- [44] Lacroix J, Marcantoni J, Petitot S et al. The carbon footprint of ambulatory gastrointestinal endoscopy. *Endoscopy* 2023; 55: 918-926.
- [45] Maurice JB, Siau K, Sebastian S et al. Green endoscopy: a call for sustainability in the midst of COVID-19. *Lancet Gastroenterol Hepatol* 2020; 5: 636-638.
- [46] Mathur J, Naing S, Mills P et al. A randomized clinical trial of vitamin D3 (cholecalciferol) in ulcerative colitis patients with hypovitaminosis D3. *PeerJ* 2017; 5: e3654.
- [47] Mortimer F, Isherwood J, Wilkinson A et al. Sustainability in quality improvement: redefining value. *Future Healthc J* 2018; 5: 88-93.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [48] Rodríguez de Santiago E, Dinis-Ribeiro M, Pohl H et al. Reducing the environmental footprint of gastrointestinal endoscopy: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) and European Society of Gastroenterology and Endoscopy Nurses and Associates (ESGENA) Position Statement. *Endoscopy* 2022; 54: 797-826.
- [49] Frazzoni L, La Marca M, Radaelli F et al. Systematic review with meta-analysis: the appropriateness of colonoscopy increases the probability of relevant findings and cancer while reducing unnecessary exams. *Aliment Pharmacol Ther* 2021; 53: 22-32.
- [50] Shandro B, Chang V, Mathur J et al. Real-life cost savings and capacity improvements on implementation of the new BSG post-polypectomy surveillance guideline. *Clin Med (Lond)* 2020; 20: 116-117.
- [51] Gisbert JP, Alcedo J, Amador J et al. V Spanish Consensus Conference on Helicobacter pylori infection treatment. *Gastroenterol Hepatol* 2022; 45: 392-417.
- [52] de Franchis R, Bosch J, Garcia-Tsao G et al. Baveno VII - Renewing consensus in portal hypertension. *J Hepatol* 2022; 76: 959-974.
- [53] Jukic A, Bakiri L, Wagner EF et al. Calprotectin: from biomarker to biological function. *Gut* 2021; 70: 1978-1988.
- [54] Pin-Vieito N, Puga M, Fernández-de-Castro D et al. Faecal immunochemical test outside colorectal cancer screening? *World J Gastroenterol* 2021; 27: 6415-6429.
- [55] Richie C. Environmental sustainability and the carbon emissions of pharmaceuticals. *J Med Ethics* 2022; 48: 334-337.
- [56] Pérez-Cuadrado-Robles E, González-Ramírez A, Lancho-Seco Á et al. Safety and risk factors for difficult endoscopist-directed ERCP sedation in daily practice: a hospital-based case-control study. *Rev Esp Enferm Dig* 2016; 108: 240-245.
- [57] Chainaki IG, Manolaraki MM, Paspatis GA. Deep sedation for endoscopic retrograde cholangiopancreatography. *World J Gastrointest Endosc* 2011; 3: 34-39.
- [58] Chai JX, Lim WY, Au Yong APS et al. A Feasibility Study on a Telemedicine Hybrid Protocol for Preoperative Anesthetic Assessment. *Cureus* 2023; 15: e40449.
- [59] Fung BM, Markarian E, Serper M et al. Current Applications of Telemedicine in Gastroenterology. *Am J Gastroenterol* 2022; 117: 1072-1079.
- [60] Gordon IO, Sherman JD, Leapman M et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Gastrointestinal Biopsies in a Surgical Pathology Laboratory. *Am J Clin Pathol* 2021; 156: 540-549.
- [61] Pouw RE, Barret M, Biermann K et al. Endoscopic tissue sampling - Part 1: Upper gastrointestinal and hepatopancreatic biliary tracts. European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Guideline. *Endoscopy* 2021; 53: 1174-1188.
- [62] El Zoghbi M, Shaukat A, Hassan C et al. Artificial Intelligence-Assisted Optical Diagnosis: A Comprehensive Review of Its Role in Leave-In-Situ and Resect-and-Discard Strategies in Colonoscopy. *Clin Transl Gastroenterol* 2023; 14: e00640.

- [63] Suzuki K, Kudo SE, Kudo T et al. Diagnostic performance of endocytoscopy with normal pit-like structure sign for colorectal low-grade adenoma compared with conventional modalities. *DEN Open* 2024; 4: e238.
- [64] Bisschops R, East JE, Hassan C et al. Advanced imaging for detection and differentiation of colorectal neoplasia: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Guideline - Update 2019. *Endoscopy* 2019; 51: 1155-1179.
- [65] Orlovic M, Ahmad A, Saunders BP. Economic impact of implementing optical diagnosis with a "resect and discard" strategy within the English Bowel Cancer Screening Programme: findings from the DISCARD3 study. *Gastrointest Endosc* 2023; 98: 73-81.e71.
- [66] Turan AS, Didden P, Peters Y et al. Factors involved in endoscopists' choice for prophylactic clipping after colorectal endoscopic mucosal resection: a discrete choice experiment. *Scand J Gastroenterol* 2020; 55: 737-744.
- [67] Bevan Griffiths-Sattenspiel WW. The Carbon Footprint of Water Available at: <https://www.csu.edu/cerc/researchreports/documents/CarbonFootprintofWater-RiverNetwork-2009.pdf>; Date Cited 2009; Date Accessed: December 2023.
- [68] Day LW, Muthusamy VR, Collins J et al. Multisociety guideline on reprocessing flexible GI endoscopes and accessories. *Gastrointest Endosc* 2021; 93: 11-33.e16.
- [69] Kawamura T, Sakai H, Ogawa T et al. Feasibility of Underwater Endoscopic Mucosal Resection for Colorectal Lesions: A Single Center Study in Japan. *Gastroenterology Res* 2018; 11: 274-279.
- [70] Fischer LS, Lumsden A, Leung FW. Water exchange method for colonoscopy: learning curve of an experienced colonoscopist in a U.S. community practice setting. *J Interv Gastroenterol* 2012; 2: 128-132.
- [71] Gutierrez-->-Aliaga L, Williams E. Co-alignment of comfort and energy saving objectives for U.S. office buildings and restaurants. *Sustain Cities Soc* 2016; 27: 32-41.
- [72] Turley M, Porter C, Garrido T et al. Use of electronic health records can improve the health care industry's environmental footprint. *Health Aff (Millwood)* 2011; 30: 938-946.
- [73] Donahue LM, Hilton S, Bell SG et al. A comparative carbon footprint analysis of disposable and reusable vaginal specula. *Am J Obstet Gynecol* 2020; 223: 225.e221-225.e227.
- [74] Talibi SS, Scott T, Hussain RA. The Environmental Footprint of Neurosurgery Operations: An Assessment of Waste Streams and the Carbon Footprint. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19.
- [75] Cunha Neves JA, Rodriguez de Santiago E, Pohl H et al. Perspectives and awareness of endoscopy healthcare professionals on sustainable practices in gastrointestinal endoscopy: results of the LEAFGREEN survey. *Endoscopy* 2024.
- [76] Haddock R, de Latour R, Siau K et al. Climate Change and Gastroenterology: Planetary Primum Non Nocere and How Industry Must Help. *Am J Gastroenterol Suppl* 2022; 117.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [77] Feucht Y, Zander K. Consumers' preferences for carbon labels and the underlying reasoning. A mixed methods approach in 6 European countries. *J Clean Prod* 2018; 178: 740-748.
- [78] Williams D. Essential biomaterials Science. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
- [79] Spaulding EH. Chemical disinfection of medical and surgical materials. In: Disinfection, Sterilization, and Preservation. Philadelphia, PA: Lea & Febiger; 1968
- [80] Beilenhoff U, Biering H, Blum R et al. Reprocessing of flexible endoscopes and endoscopic accessories used in gastrointestinal endoscopy: Position Statement of the European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) and European Society of Gastroenterology Nurses and Associates (ESGENA) - Update 2018. *Endoscopy* 2018; 50: 1205-1234.
- [81] Reynier T, Berahou M, Albaladejo P et al. Moving towards green anaesthesia: Are patient safety and environmentally friendly practices compatible? A focus on single-use devices. *Anaesth Crit Care Pain Med* 2021; 40: 100907.
- [82] Kethu SR, Adler DG, Conway JD et al. ERCP cannulation and sphincterotomy devices. *Gastrointest Endosc* 2010; 71: 435-445.
- [83] Yoon JH, Yoon BC, Lee HL et al. Comparison of sterilization of reusable endoscopic biopsy forceps by autoclaving and ethylene oxide gas. *Dig Dis Sci* 2012; 57: 405-412.
- [84] Kozarek RA, Ralz SL, Ball TJ et al. Reuse of disposable sphincterotomes for diagnostic and therapeutic ERCP: a one-year prospective study. *Gastrointest Endosc* 1999; 49: 39-42.
- [85] Prat F, Spieler JF, Paci S et al. Reliability, cost-effectiveness, and safety of reuse of ancillary devices for ERCP. *Gastrointest Endosc* 2004; 60: 246-252.
- [86] Visrodia K, Haseeb A, Hanada Y et al. Reprocessing of single-use endoscopic variceal band ligation devices: a pilot study. *Endoscopy* 2017; 49: 1202-1208.
- [87] Rizzo J, Bernstein D, Gress F. A performance, safety and cost comparison of reusable and disposable endoscopic biopsy forceps: a prospective, randomized trial. *Gastrointest Endosc* 2000; 51: 257-261.
- [88] Regulations 2017. Official Journal of the European Union. Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council on medical devices, amending Directive 2001/83/EC, Regulation (EC) No 178/2002 and Regulation (EC) No 1223/2009 and repealing Council Directives 90/385/EEC and 93/42/EEC. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745>. Accessed: January 2024
- [89] Ministry of Environment of Denmark Environmental Protection Agency. Environmental and Health Assessment of Alternatives to Phthalates and to flexible PVC. Available from: https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2001/87-7944-407-5/html/helepubl_eng.htm. Accessed: January 2024

- [90] Devasahayam S, Bhaskar Raju G, Mustansar Hussain C. Utilization and recycling of end of life plastics for sustainable and clean industrial processes including the iron and steel industry. *Mater Sci Energy Technol* 2019; 2: 634-646.
- [91] Leung J. Chap. 3. Fundamentals of ERCP. In: Cotton P, Leung J, eds. Advanced digestive endoscopy: ERCP. <https://www.wiley.com/en-us/9781405150248>: Wiley-Blackwel; 2005: 17-80.
- [92] Kovaleva J, Peters FT, van der Mei HC et al. Transmission of infection by flexible gastrointestinal endoscopy and bronchoscopy. *Clin Microbiol Rev* 2013; 26: 231-254.
- [93] Balan GG, Sfarti CV, Chiriac SA et al. Duodenoscope-associated infections: a review. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis* 2019; 38: 2205-2213.
- [94] Anderson MA, Fisher L, Jain R et al. Complications of ERCP. *Gastrointestinal endoscopy* 2012; 75: 467-473.
- [95] Kwakman JA, Erler NS, Vos MC et al. Risk evaluation of duodenoscope-associated infections in the Netherlands calls for a heightened awareness of device-related infections: a systematic review. *Endoscopy* 2022; 54: 148-155.
- [96] Ofstead CL, Heymann OL, Quick MR et al. Residual moisture and waterborne pathogens inside flexible endoscopes: Evidence from a multisite study of endoscope drying effectiveness. *Am J Infect Control* 2018; 46: 689-696.
- [97] Wang P, Xu T, Ngamruengphong S et al. Rates of infection after colonoscopy and oesophagogastroduodenoscopy in ambulatory surgery centres in the USA. *Gut* 2018; 67: 1626-1636.
- [98] Larsen S, Russell RV, Ockert LK et al. Rate and impact of duodenoscope contamination: A systematic review and meta-analysis. *EClinicalMedicine* 2020; 25: 100451.
- [99] Kim S, Russell D, Mohamadnejad M et al. Risk factors associated with the transmission of carbapenem-resistant Enterobacteriaceae via contaminated duodenoscopes. *Gastrointest Endosc* 2016; 83: 1121-1129.
- [100] US Food and Drug Administration. FDA Executive Summary: Infections Associated with Reprocessed Duodenoscopes. Available from: <https://www.fda.gov/medical-devices/reprocessing-reusable-medical-devices/infections-associated-reprocessed-duodenoscopes>. Accessed: December 2023
- [101] Aumeran C, Poincloux L, Souweine B et al. Multidrug-resistant *Klebsiella pneumoniae* outbreak after endoscopic retrograde cholangiopancreatography. *Endoscopy* 2010; 42: 895-899.
- [102] US Food and Drug Administration. Use Duodenoscopes with Innovative Designs to Enhance Safety: FDA Safety Communication. Available from: <https://www.fda.gov/medical-devices/safety-communications/use-duodenoscopes-innovative-designs-enhance-safety-fda-safety-communication>. Accessed: December 2023
- [103] Beilenhoff U, Biering H, Blum R et al. Prevention of multidrug-resistant infections from contaminated duodenoscopes: Position Statement of the European Society of

8. BIBLIOGRAFÍA

- Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) and European Society of Gastroenterology Nurses and Associates (ESGENA). *Endoscopy* 2017; 49: 1098-1106.
- [104] Bang JY, Sutton B, Hawes R et al. Concept of disposable duodenoscope: at what cost? *Gut* 2019; 68: 1915-1917.
- [105] Global Alliance for Incinerator Alternatives. Incinerators: Myths vs. Facts about "Waste to Energy". Available from: https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Incinerator_Myths_vs_Facts-Feb2012.pdf Accessed: January 2024
- [106] Muscarella LF. Risk of transmission of carbapenem-resistant Enterobacteriaceae and related "superbugs" during gastrointestinal endoscopy. *World J Gastrointest Endosc* 2014; 6: 457-474.
- [107] Das A, Cangelosi MJ, Muthusamy VR. A Cost-Effectiveness Analysis of Exalt Model D Single-Use Duodenoscope Versus Current Duodenoscope Reprocessing Methods. *Tech Innov Gastrointest Endosc* 2022; 24: 16-25.
- [108] Le NNT, Hernandez LV, Vakil N et al. Environmental and health outcomes of single-use versus reusable duodenoscopes. *Gastrointest Endosc* 2022; 96: 1002-1008.
- [109] Adhikari S, Kelkar V, Kumar R et al. Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: a mini-review. *Polym Int* 2022; 71: 543-551.
- [110] Skoog DA, Holler FJ, Crouch SR. Principles of Instrumental Analysis. 7 edn. Boston (USA): Cengage Learning; 2017.
- [111] Fu W, Min J, Jiang W et al. Separation, characterization and identification of microplastics and nanoplastics in the environment. *Sci Total Environ* 2020; 721: 137561.
- [112] Nebatti A PC, Brors G, Curdts B, Atakan B. Study of Cavitation Erosion Experiments on Thermally Oxidized Rutile Phase TiO₂ Films on Stainless Steel. *Am J Mater Eng Technol* 2017; 5.
- [113] Brusseau M, Pepper I, Gerba C. Environmental and Pollution Science. Netherland: Elsevier Science; 2019.
- [114] Rigby M, Prinn R, O'Doherty S et al. Recent Trends in Non-CO₂ Greenhouse Gases, and their Implications for Emissions and Lifetime Estimates. In: AGU Fall Meeting Abstracts. 2012: A24A-01.
- [115] Pandey D, Agrawal M, Pandey JS. Carbon footprint: current methods of estimation. *Environ Monit Assess* 2011; 178: 135-160.
- [116] Rizan C, Brophy T, Lillywhite R et al. Life cycle assessment and life cycle cost of repairing surgical scissors. *Int J Life Cycle Ass* 2022; 27: 780-795.
- [117] Collins CM, Steg L, Koning MAS. Customers' values, beliefs on sustainable corporate performance, and buying behavior. *Psychol Market* 2007; 24: 555-577.
- [118] Curran MA. Life-cycle assessment: principles and practice Available at: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF>; Date Accessed: December 2023.

- [119] Gubler C, Vetter D, Schmidt HM et al. Preemptive endoluminal vacuum therapy to reduce anastomotic leakage after esophagectomy: a game-changing approach? *Dis Esophagus* 2019; 32.
- [120] Silva D, Nunes AO, da Silva Moris A et al. How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. In: Proceedings of the VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Medellin, Colombia. 2017: 10-15.
- [121] van Zelm R, Roy P-O, Hauschild MZ et al. Acidification. Life cycle impact assessment 2015; 163-176.
- [122] Rosenbaum RK. Ecotoxicity. Life cycle impact assessment 2015; 139-162.
- [123] Nixon SW. Eutrophication and the macroscope. In: Eutrophication in Coastal Ecosystems: Towards better understanding and management strategies Selected Papers from the Second International Symposium on Research and Management of Eutrophication in Coastal Ecosystems, 20–23 June 2006, Nyborg, Denmark. Springer; 2009: 5-19.
- [124] Jolliet O, Fantke P. Human toxicity. Life cycle impact assessment 2015; 75-96.
- [125] Steinmann Z, Huijbregts MA. 4. Ionizing radiation. Department of Environmental Science, Radboud University, Nijmegen 2014.
- [126] Lane JL. Stratospheric ozone depletion. *Life Cycle Impact Assessment* 2015; 51-73.
- [127] Yellishetty M, Ranjith P, Tharumarajah A et al. Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges. *Int J Life Cycle Ass* 2009; 14: 257-267.
- [128] Berger M, Finkbeiner M. Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? *Sustainability* 2010; 2: 919-944.
- [129] Dolwani S, Saleem H, Thompson IW et al. A comparison of three types of biopsy forceps in the endoscopic surveillance of Barrett's oesophagus. *Endoscopy* 2002; 34: 946-949.
- [130] dos Santos WN, de Sousa JA, Gregorio R. Thermal conductivity behaviour of polymers around glass transition and crystalline melting temperatures. *Polym Test* 2013; 32: 987-994.
- [131] Rieger J. The glass transition temperature Tg of polymers—Comparison of the values from differential thermal analysis (DTA, DSC) and dynamic mechanical measurements (torsion pendulum). *Polym Test* 2001; 20: 199-204.
- [132] Li D, Zhou L, Wang X et al. Effect of Crystallinity of Polyethylene with Different Densities on Breakdown Strength and Conductance Property. *Materials* 2019; 12: 1746.
- [133] Dubdub I, Al-Yaari M. Pyrolysis of Mixed Plastic Waste: I. Kinetic Study. *Materials* 2020; 13: 4912.
- [134] Zhu N, Chen H, Gao X et al. Fabrication of LDPE/PS interpolymer resin particles through a swelling suspension polymerization approach. *e-Polymers* 2020; 20: 361-368.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [135] Ramer G, Lendl B. Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy. In: Meyers R, Meyers R, eds. Encyclopedia of Analytical Chemistry.
- [136] Metler Toledo. ATR-FTIR Spectroscopy. Fundamentals of Attenuated Total Reflectance (ATR). Available from: https://www.mt.com/gb/en/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-atr.html#:~:text=ATR%2DFTIR%20spectroscopy%20is%20utilized,industries%20such%20as%20pharmaceuticals%2C%20materials. Accessed: April 2024
- [137] Girão AV, Caputo G, Ferro MC. Chapter 6 - Application of Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS). In: Rocha-Santos TAP, Duarte AC, eds. Comprehensive Analytical Chemistry. Elsevier; 2017
- [138] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis, in contribution of Working Group I (WGI) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In: Alexander L, Allen S, Bindoff N et al., eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; 2013
- [139] Martín-Cabezuelo R, Vilariño-Feltrer G, Campillo-Fernández AJ et al. Materials Science Toolkit for Carbon Footprint Assessment: A Case Study for Endoscopic Accessories of Common Use. ACS Environmental Au 2024; 4: 42-50.
- [140] National Geospatial-Intelligence Agency. Distances between ports, Eleventh Edition Available from: <https://msi.nga.mil/Publications/DBP>. Accessed: January 2024
- [141] Mesa J, Maury H, Arrieta R et al. A novel approach to include sustainability concepts in classical DFMA methodology for sheet metal enclosure devices. Res Eng Des 2018; 29: 227-244.
- [142] Ditac G, Cottinet PJ, Quyen Le M et al. Carbon footprint of atrial fibrillation catheter ablation. Europace 2023; 25: 331-340.
- [143] Cunha Neves JA, Roseira J, Queirós P et al. Targeted intervention to achieve waste reduction in gastrointestinal endoscopy. Gut 2022; gutjnl-2022-327005.
- [144] Center for International Environmental Law. Plastic is Carbon: Unwrapping the ‘Net Zero’ Myth (Oct 2021). Available from: <https://www.ciel.org/reports/plastic-is-carbon-unwrapping-the-net-zero-myth/>. Accessed: December 2023
- [145] Olimpus Europe. Olympus Cleaner and Disinfectant. GA Process Chemistry. Available from: https://www.olympus.es/medical/rmt/media/es/Content/Content-MSD/Documents/Data-sheets/GA-process-chemistry-disinfectant_safety-data-sheet_001_V1_en_20120501.pdf. Accessed: January 2024
- [146] Department for Energy Security and Net Zero Greenhouse gas reporting: conversion factors 2022. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>. Accessed: January 2024

- [147] López-Muñoz P, Martín-Cabezuelo R, Lorenzo-Zúñiga V et al. Life cycle assessment of routinely used endoscopic instruments and simple intervention to reduce our environmental impact. *Gut* 2023; 72: 1692-1697.
- [148] Zhang X, Chen Y, Zhang Y et al. Effects of ABS-g-MAH on mechanical properties and compatibility of ABS/PC alloy. *J Appl Polym Sci* 2001; 81: 831-836.
- [149] Rodrigues PV, Ramoa B, Torres AR et al. Enhancing the Interface Behavior on Polycarbonate/Elastomeric Blends: Morphological, Structural, and Thermal Characterization. *Polymers* 2023; 15: 1773.
- [150] Desrousseaux C, Cueff R, Aumeran C et al. Fabrication of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanostructures with Anodic Alumina Oxide Templates, Characterization and Biofilm Development Test for *Staphylococcus epidermidis*. *PLoS ONE* 2015.
- [151] Puype F, Samsonek J, Knoop J et al. Evidence of waste electrical and electronic equipment (WEEE) relevant substances in polymeric food-contact articles sold on the European market. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess* 2015; 32.
- [152] Fahmy T, Elsayed I, Abdelwahed H. Optical Properties of Poly (Vinyl Chloride-co-Vinyl Acetate-co-2-Hydroxypropyl Acrylate) / (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Blends. *Int J Eng Res Technol* 2018; 11.
- [153] Pal S, Bhaduria S, Kushwaha P. Pitting Corrosion Behavior of F304 Stainless Steel Under the Exposure of Ferric Chloride Solution. *J Bio- Triboro-Corros* 2019; 5.
- [154] Kruehong S, Kruehong C, Chindaprasirt P et al. Candle Flame Synthesis and Electrochemical Behavior of Chain-like Carbon Nano-onions on 304 Stainless Steel. *Chiang Mai J Sci* 2015; 42: 745-751.
- [155] Frischknecht R, Braunschweig A, Hofstetter P et al. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Envirn Impact Assess Rev* 2000; 20: 159-189.
- [156] Jestratijevic I, Maystorovich I, Vrabič-Brodnjak U. The 7 Rs sustainable packaging framework: Systematic review of sustainable packaging solutions in the apparel and footwear industry. *Sustain Prod Consum* 2022; 30: 331-340.
- [157] Davis NF, McGrath S, Quinlan M et al. Carbon Footprint in Flexible Ureteroscopy: A Comparative Study on the Environmental Impact of Reusable and Single-Use Ureteroscopes. *J Endourol* 2018; 32: 214-217.
- [158] Misrai V, Rijo E, Cottenceau JB et al. A Standardized Method for Estimating the Carbon Footprint of Disposable Minimally Invasive Surgical Devices: Application in Transurethral Prostate Surgery. *Ann Surg Open* 2021; 2: e094.
- [159] Sebastian S, Dhar A, Baddeley R et al. Green endoscopy: British Society of Gastroenterology (BSG), Joint Accreditation Group (JAG) and Centre for Sustainable Health (CSH) joint consensus on practical measures for environmental sustainability in endoscopy. *Gut* 2023; 72: 12-26.
- [160] Thiel CL, Eckelman M, Guido R et al. Environmental impacts of surgical procedures: life cycle assessment of hysterectomy in the United States. *Environ Sci Technol* 2015; 49: 1779-1786.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [161] Thiel CL, Schehlein E, Ravilla T et al. Cataract surgery and environmental sustainability: Waste and lifecycle assessment of phacoemulsification at a private healthcare facility. *J Cataract Refract Surg* 2017; 43: 1391-1398.
- [162] Tan E, Lim D. Carbon footprint of dermatologic surgery. *Australas J Dermatol* 2021; 62: e170-e177.
- [163] A W, I T, S R et al. Surgery and the NHS carbon footprint. *Ann R Coll Surg Engl* 2020; 102: 182-185.
- [164] Bhatia V, Bhardwaj V, Tevethia HV. Reprocessing and Reuse of Endoscopic Accessories. *J Dis Endosc* 2021; 12: 214-220.
- [165] Lim CH, Choi MG, Kim WC et al. Performance and cost of disposable biopsy forceps in upper gastrointestinal endoscopy: comparison with reusable biopsy forceps. *Clin Endosc* 2012; 45: 62-66.
- [166] Kinney TP, Kozarek RA, Raltz S et al. Contamination of single-use biopsy forceps: a prospective in vitro analysis. *Gastrointest Endosc* 2002; 56: 209-212.
- [167] Yang R, Ng S, Nichol M et al. A cost and performance evaluation of disposable and reusable biopsy forceps in GI endoscopy. *Gastrointest Endosc* 2000; 51: 266-270.
- [168] Hambrick D, 3rd. Reprocessing of single-use endoscopic biopsy forceps and snares. One hospital's study. *Gastroenterol Nurs* 2001; 24: 112-115.
- [169] Kozarek RA, Raltz SL, Brandabur JJ et al. In vitro study and in vivo application of a reusable double-channel sphincterotome. *Endoscopy* 2001; 33: 401-404.
- [170] Jung M, Beilenhoff U, Pietsch M et al. Standardized reprocessing of reusable colonoscopy biopsy forceps is effective: results of a German multicenter study. *Endoscopy* 2003; 35: 197-202.
- [171] Deprez PH, Horsmans Y, Van Hassel M et al. Disposable versus reusable biopsy forceps: a prospective cost evaluation. *Gastrointest Endosc* 2000; 51: 262-265.
- [172] Nabi Z, Tang RSY, Sundaram S et al. Single-use accessories and endoscopes in the era of sustainability and climate change-A balancing act. *J Gastroenterol Hepatol* 2024; 39: 7-17.
- [173] Dormer A, Finn DP, Ward P et al. Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *J Clean Prod* 2013; 51: 133-141.
- [174] Pasqualino J, Meneses M, Castells F. The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal. *J Food Eng* 2011; 103: 357-365.
- [175] Ofstead CL, Buro BL, Hopkins KM et al. Duodenoscope-associated infection prevention: A call for evidence-based decision making. *Endosc Int Open* 2020; 8: E1769-e1781.
- [176] Muthusamy VR, Bruno MJ, Kozarek RA et al. Clinical Evaluation of a Single-Use Duodenoscope for Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography. *Clin Gastroenterol Hepatol* 2020; 18: 2108-2117.e2103.
- [177] Andriulli A, Loperfido S, Napolitano G et al. Incidence rates of post-ERCP complications: a systematic survey of prospective studies. *Am J Gastroenterol* 2007; 102: 1781-1788.

- [178] Kochar B, Akshintala VS, Afghani E et al. Incidence, severity, and mortality of post-ERCP pancreatitis: a systematic review by using randomized, controlled trials. *Gastrointest Endosc* 2015; 81: 143-149.e149.
- [179] Rauwers AW, Kwakman JA, Vos MC et al. Endoscope-associated infections: A brief summary of the current state and views toward the future. *Tech Gastrointest Endosc* 2019; 21: 150608.
- [180] U.S. Food and Drug Administration. Medical Device FDA Safety Communication 2018. Available from: <https://www.fda.gov/medical-devices/medical-device-safety/safety-communications>. Accessed: January 2024
- [181] Lee DH, Kim DB, Kim HY et al. Increasing potential risks of contamination from repetitive use of endoscope. *Am J Infect Control* 2015; 43: e13-17.
- [182] Rubin ZA, Kim S, Thaker AM et al. Safely reprocessing duodenoscopes: current evidence and future directions. *Lancet Gastroenterol Hepatol* 2018; 3: 499-508.
- [183] Schoor A, Voor in 't holt A, Severin J et al. Value of Nontargeted Screening for Highly Resistant Microorganisms: The MOVE Study. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2020; 41: s429-s430.
- [184] Kwakman JA, Poley MJ, Vos MC et al. Single-use duodenoscopes compared with reusable duodenoscopes in patients carrying multidrug-resistant microorganisms: a break-even cost analysis. *Endosc Int Open* 2023; 11: E571-e580.
- [185] Bang JY, Hawes R, Varadarajulu S. Equivalent performance of single-use and reusable duodenoscopes in a randomised trial. *Gut* 2021; 70: 838-844.
- [186] Napoléon B, Gonzalez JM, Grandval P et al. Evaluation of the performances of a single-use duodenoscope: Prospective multi-center national study. *Dig Endosc* 2022; 34: 215-221.
- [187] Agrawal D, Tang Z. Sustainability of Single-Use Endoscopes. *Tech Innov Gastrointest Endosc* 2021; 23: 353-362.
- [188] Barakat MT, Ghosh S, Banerjee S. Cost utility analysis of strategies for minimizing risk of duodenoscope-related infections. *Gastrointest Endosc* 2022; 95: 929-938.e922.
- [189] United States Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. Available from: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator#results>. Accessed: December 2023
- [190] Teles de Campos S, Papaefthymiou A, Florou T et al. Impact of center and endoscopist ERCP volume on ERCP outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Gastrointestinal Endoscopy* 2023; 98: 306-315.e314.
- [191] Rex DK, Sieber M, Lehman GA et al. A double-reprocessing high-level disinfection protocol does not eliminate positive cultures from the elevators of duodenoscopes. *Endoscopy* 2018; 50: 588-596.
- [192] Heuvelmans M, Wunderink HF, van der Mei HC et al. A narrative review on current duodenoscope reprocessing techniques and novel developments. *Antimicrob Resist Infect Control* 2021; 10: 171.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [193] Bomman S, Kozarek RA, Thaker AM et al. Economic burden of enhanced practices of duodenoscopes reprocessing and surveillance: balancing risk and cost containment. *Endosc Int Open* 2021; 9: E1404-e1412.
- [194] Thaker AM, Muthusamy VR, Sedarat A et al. Duodenoscope reprocessing practice patterns in U.S. endoscopy centers: a survey study. *Gastrointest Endosc* 2018; 88: 316-322.e312.
- [195] Bruno MJ, Beyna T, Carr-Locke D et al. Global prospective case series of ERCPs using a single-use duodenoscope. *Endoscopy* 2023; 55: 1103-1114.
- [196] Voiosu A, de Santiago ER, Voiosu T. Getting the full picture: let's always include sustainability in trials reporting new technology! *Gastrointest Endosc* 2023; 97: 601.
- [197] Darak H, Giri S, Sundaram S. Review: Disposable Duodenoscopes in the Era of Climate Change—A Global Perspective. *J Gastrointest Infect* 2022; 12: 011-017.
- [198] Ridtitid W, Thummongkol T, Chatsuwan T et al. Bacterial contamination and organic residue after reprocessing in duodenoscopes with disposable distal caps compared with duodenoscopes with fixed distal caps: a randomized trial. *Gastrointest Endosc* 2022; 96: 814-821.
- [199] Forbes N, Elmunzer BJ, Allain T et al. Effect of Disposable Elevator Cap Duodenoscopes on Persistent Microbial Contamination and Technical Performance of Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography: The ICECAP Randomized Clinical Trial. *JAMA Intern Med* 2023; 183: 191-200.
- [200] Luo X, Ji M, Zhang S et al. Disposable versus reusable gastrosopes: a prospective randomized noninferiority trial. *Gastrointest Endosc* 2022; 96: 250-261.
- [201] Li DF, Shi RY, Tian YH et al. The feasibility and safety of disposable endoscope vs. conventional endoscope for upper gastrointestinal tract examination: a multicenter, randomized, parallel, non-inferiority trial. *Z Gastroenterol* 2022; 60: 1314-1319.
- [202] Jin P, Wang X, Yu DL et al. Safety and efficacy of a novel disposable sheathed gastroscopic system in clinical practice. *J Gastroenterol Hepatol* 2014; 29: 757-761.
- [203] Ebigbo A, Tadic V, Schlottmann J et al. Evaluation of a single-use gastroscope in patients presenting with suspected upper gastrointestinal hemorrhage: a pilot feasibility study (One-Scope I). *Endoscopy* 2023; 55: 940-944.
- [204] Okimoto K, Matsumura T, Fujie M et al. Endoscopic submucosal dissection for early gastric cancer, using a disposable endoscope. *Endoscopy* 2023; 55: E881-e882.
- [205] Pineau L. Endoscope reprocessing: Retrospective analysis of 90,311 samples. *Endosc Int Open* 2023; 11: E247-e257.
- [206] Goyal H, Larsen S, Perisetti A et al. Gastrointestinal endoscope contamination rates - elevators are not only to blame: a systematic review and meta-analysis. *Endosc Int Open* 2022; 10: E840-e853.

- [207] Scholz PM, Kirstein MM, Solbach PC et al. [A systematic analysis of nosocomial outbreaks of nosocomial infections after gastrointestinal endoscopy]. Z Gastroenterol 2023; 61: 536-543.
- [208] Ciocîrlan M. Low-cost disposable endoscope: pros and cons. Endosc Int Open 2019; 7: E1184-e1186.
- [209] Han ZL, Lin BT, Wang ZJ et al. Evaluation of a novel disposable esophagogastroduodenoscopy system in emergency, bedside, and intraoperative settings: Pilot study (with videos). Dig Endosc 2023; 35: 857-865.
- [210] Champion JK, Hunt T, DeLisle N. Role of routine intraoperative endoscopy in laparoscopic bariatric surgery. Surg Endosc 2002; 16: 1663-1665.
- [211] Larsen S, Kalloo A, Hutfless S. The hidden cost of colonoscopy including cost of reprocessing and infection rate: the implications for disposable colonoscopes. Gut 2020; 69: 197-200.

9. ANEXOS

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA TESIS DOCTORAL

Publicaciones

López-Muñoz P, Martín-Cabezuelo R, Lorenzo-Zúñiga V, Vilariño-Feltre G, Tort-Ausina I, Vidaurre A, Pons-Beltrán V.

Life cycle assessment of routinely used endoscopic instruments and simple intervention to reduce our environmental impact.

Gut 2023; 72: 1692-1697

Endoscopy

Original research

Life cycle assessment of routinely used endoscopic instruments and simple intervention to reduce our environmental impact

Pedro López-Muñoz ,¹ Rubén Martín-Cabezuelo ,^{1,2}
 Vicente Lorenzo-Zúñiga ,¹ Guillermo Vilariño-Feltre ,² Isabel Tort-Ausina ,^{2,3}
 Ana Vidaurre ,^{2,3} Vicente Pons Beltran

¹Department of Gastroenterology, La Fe Health Research Institute - IIS La Fe, Valencia, Spain
²Center for Biomaterials and Tissue Engineering (CBIT), Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain
³CIBER-BBN, ISCIII, Spain

Correspondence to: Professor Vicente Lorenzo-Zúñiga, La Fe University and Polytechnic Hospital Valencia, 46026, Spain; vlorenzozuniga@gmail.com

PL-M and RM-C contributed equally.

Received 19 January 2023
 Accepted 12 April 2023

WHAT IS ALREADY KNOWN ON THIS TOPIC
 GI endoscopy units represent the third largest producers of medical waste. We aimed to determine endoscopic instrument composition and life cycle assessment (LCA) and to assess a sustainability proposal based on a mark on the instruments that identifies parts can be safely recycled or 'green mark'.
Design Material composition analysis and LCA of forceps, snares and clips from four different manufacturers (A–D) were performed with four different methods. Carbon footprint from production, transportation and end of life of these instruments was calculated. In 30 consecutive procedures, we marked the contact point with the working channel, 5 cm away from that point was considered as green mark. One-week prospective study was conducted with 184 procedures evaluating 143 instruments (75 forceps, 49 snares and 19 haemoclips) to assess the efficacy of this recyclable mark.
Results Composition from different manufacturers varied widely. Most common materials were high global warming potential (GWP) waste (polyethylene, polypropylene and acrylonitrile) and low GWP waste (stainless steel). Significant differences were found for the forceps (0.31–0.47 kg of CO₂ equivalent (CO₂-eq)) and haemoclips (0.41–0.57 kg CO₂-eq) between the manufacturers. Green mark was established 131.26 cm for gastroscope and 195.32 cm for colonoscope. One-week activity produced 67.74 kg CO₂-eq. Applying our sustainability intervention, we could reduce up to 27.44% (18.26 kg CO₂-eq). This allows the recycling of 61.7% of the instrument total weight (4.69 kg).
Conclusion Knowledge of carbon footprint is crucial to select the most sustainable alternatives because there are large variations between brands. A mark to identify recyclable parts could reduce our environmental impact significantly.

WHAT THIS STUDY ADDS
 → In our daily practice, current global carbon footprint related to endoscopic procedures needs to be urgently evaluated.
 → Knowledge of instrument composition is crucial to select the most sustainable alternatives because there are large variations of the same instrument between brands.
 → A sustainability intervention based on a mark on the instruments that identifies parts that can be recyclable could be able to reduce the amount of BMW and increase recyclable medical waste.

HOW THIS STUDY MIGHT AFFECT RESEARCH, PRACTICE OR POLICY
 → It is important to assess the carbon footprint in kilogram of CO₂ equivalent of our consumables to raise awareness and change our clinical decision making.
 → Through innovative industrial solutions, we can move towards a more sustainable endoscopy.

GI endoscopy units represent the third largest producers of medical waste, divided into regular waste, recyclable waste and biomedical waste (BMW), the latter to be incinerated at high temperature resulting in harmful emissions.^{3,6} Each single endoscopy procedure generates on average up to 2.1 kg of general waste, being regular waste (63%), BMW (28%) and recyclable (9%).⁷ Simple sustainability interventions such as team education in terms of waste handling, segregation and disposal may result in a total decrease of carbon emissions by 31.6%.⁸ The European Society of Gastrointestinal

Check for updates

© Author(s) (or their employer(s)) 2023. No commercial re-use. See rights and permissions. Published by BMJ.

To cite: López-Muñoz P, Martín-Cabezuelo R, Lorenzo-Zúñiga V, et al. Gut Epub ahead of print: [please include Day Month Year]. doi:10.1136/gutjnl-2023-329544

INTRODUCTION
 Greenhouse gas (GHG) emissions derived from human activity play a crucial role in climate change.¹ Healthcare systems contribute significantly to the world's carbon footprint, representing 4.49%–5.4% of total GHG emissions around the world by the increasing use of disposable plastic medical and personal protective equipment.^{2,4}

López-Muñoz P, et al. Gut 2023;0:1–6. doi:10.1136/gutjnl-2023-329544

1

Gut: first published as 10.1136/gutjnl-2023-329544 on 26 April 2023. Downloaded from <http://gut.bmjjournals.com/> on April 26, 2023 by guest. Protected by copyright.

195

9. ANEXOS

Martín-Cabezuelo R, Vilariño-Feltre G, Campillo-Fernández AJ, Lorenzo-Zúñiga V, Pons V, López-Muñoz P, Tort-Ausina I.

Materials Science Toolkit for Carbon Footprint Assessment: A Case Study for Endoscopic Accessories of Common Use.

ACS Environmental Au 2024; 4: 42–50

Downloaded via 81.202.151.189 on April 21, 2024 at 17:51:42 (UTC).
See https://pubs.acs.org/sharingguidelines for options on how to legitimately share published articles.

ACS ENVIRONMENTAL AU
AN OPEN ACCESS JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY

Open Access

This article is licensed under CC-BY-NC-ND 4.0

Article

Materials Science Toolkit for Carbon Footprint Assessment: A Case Study for Endoscopic Accessories of Common Use

Rubén Martín-Cabezuelo,* Guillermo Vilariño-Feltre, Alberto J. Campillo-Fernández,* Vicente Lorenzo-Zúñiga, Vicente Pons, Pedro López-Muñoz, and Isabel Tort-Ausina

Cite This: ACS Environ. Au 2024, 4, 42–50 | Read Online

ACCESS | Metrics & More | Article Recommendations

ABSTRACT: Ironically, healthcare systems are key agents in respiratory-related diseases and estimated deaths because of the high impact of their greenhouse gas emissions, along with industry, transportation, and housing. Based on safety requirements, hospitals and related services use an extensive number of consumables, most of which end up incinerated at the end of their life cycle. A thorough assessment of the carbon footprint of such devices typically requires knowing precise information about the manufacturing process, which is rarely available in detail because of the many materials, pieces, and steps involved during the fabrication. Yet, the tools most often used for determining the environmental impact of consumer goods require a bunch of parameters, mainly based on the material composition of the device. Here, we report a basic set of analytical methods that provide the information required by the software OpenLCA to calculate the main outcome related to environmental impact, greenhouse gas emissions. Through thermogravimetry, calorimetry, infrared spectroscopy, and elemental analysis, we proved that obtaining relevant data for the calculator in the exemplifying case of endoscopy tooling or accessories is possible. This routine procedure opens the door to a broader, more accurate analysis of the environmental impact of everyday work at hospital services, offering potential alternatives to minimize it.

KEYWORDS: endoscopy accessories, materials characterization, carbon footprint, life cycle assessment, toolkit

1. INTRODUCTION

In recent years, climate change has become one of the most important challenges facing humanity, and the threat of global warming poses serious risks to people around the world, with human activities being the main culprit.¹

Carbon dioxide (CO_2) is one of the most important greenhouse gases (GHG), and it is released into the atmosphere due to human activities, such as the burning of fossil fuels as well as natural processes like volcanic eruptions and respiration.^{2–5} Approximately 95% of scientists and climate experts believe that human activities have significantly altered the earth's atmosphere, causing global warming.⁶ GHG generally absorbs a certain amount of energy in a way that protects the environment from extreme cold, but the important contribution of GHG to global warming must be addressed as temperatures continue to rise.^{3,6}

In this general background, healthcare represents about 5% of global environmental impact, with a tendency to increase monotonically.^{7–10} In Italy's healthcare system, the top three highest-generating departments of hazardous waste were anesthetics ($5.96 \text{ kg-day}^{-1} \cdot \text{bed}^{-1}$), pediatric and intensive care ($3.37 \text{ kg-day}^{-1} \cdot \text{bed}^{-1}$), and gastroenterology-digestive

endoscopy ($3.09 \text{ kg-day}^{-1} \cdot \text{bed}^{-1}$).¹¹ According to Lenzen et al.,⁷ interventions to reduce the effect of contamination in hospitals should focus on reducing waste (avoiding unnecessary plastics and reducing single-use items and drugs) and reducing pollution (especially anesthetic gases and asthma inhaler propellants, as well as transport).

Most healthcare waste is nonhazardous, potentially recyclable waste. If the waste content is not examined, a significant percentage of nonhazardous waste may not be adequately treated, increasing the cost.¹¹ The legislation of the majority of the countries includes safeguarding the environment, reducing wastefulness, and looking for the most efficient and cost-effective waste treatment.¹² Vaccari et al.¹¹ showed that, although there is a positive correlation between healthcare expenditure and waste derivative, the example of Germany

Received: August 3, 2023
Revised: December 21, 2023
Accepted: December 22, 2023
Published: December 29, 2023

<https://doi.org/10.1021/acsevironau.3c00044>
ACS Environ. Au 2024, 4, 42–50

López-Muñoz P, Martín-Cabezuelo R, Lorenzo-Zúñiga V, García-Castellanos M, Vilariño-Feltre G, Tort-Ausina I, Campillo-Fernández AJ, Pons-Beltrán V.

Environmental footprint and material composition comparison of single-use and reusable duodenoscopes

Endoscopy, bajo segunda revisión previo a su publicación



**ENVIRONMENTAL FOOTPRINT AND MATERIAL
COMPOSITION COMPARISON OF SINGLE-USE AND
REUSABLE DUODENOSCOPES**

Journal:	<i>Endoscopy</i>
Manuscript ID:	ENDOS-2024-23799.R1
Manuscript Type:	Original Article
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Lopez-Muñoz, Pedro; Hospital Universitari i Politècnic La Fe, Gastroenterology & Hepatology Martín-Cabezuelo, Rubén; Polytechnic University of Valencia, Centre for Biomaterials and Tissue Engineering Lorenzo-Zúñiga, Vicente; La Fe University and Polytechnic Hospital, Department of Gastroenterology. Endoscopy unit / IIS La Fe; Valencia Catholic University Saint Vincent Martyr Faculty of Medicine and Dentistry, Medicine García-Castellanos, Marina; La Fe University and Polytechnic Hospital, Department of Gastroenterology. Endoscopy unit / IIS La Fe Vilariño-Feltre, Guillermo; Polytechnic University of Valencia, Centre for Biomaterials and Tissue Engineering Tort-Ausina, Isabel; Polytechnic University of Valencia, Centre for Biomaterials and Tissue Engineering Campillo-Fernández, Alberto; Polytechnic University of Valencia, Centre for Biomaterials and Tissue Engineering Pons Beltrán, Vicente; La Fe University and Polytechnic Hospital, Department of Gastroenterology. Endoscopy Unit / IIS La Fe
Keyword:	04 Pancreatobiliary (ERCP/PTCD), 10 Other focus, 09 Quality and logistical aspects
Abstract:	<p>Background: Infection outbreaks associated with contaminated reusable duodenoscopes (RDs) have induced the development of novel single-use duodenoscopes (SDs). This study aims to analyse the material composition and life cycle assessment (LCA) of RDs and SDs to assess the sustainability of global and partial SD implementation.</p> <p>Methods: A single-centre study evaluated material composition analysis and LCA of one RD and two SDs from different manufacturers (A, B). Material composition analysis was performed to evaluate the thermochemical properties of the duodenoscope components. Carbon footprint was calculated using environmental software. We compared the sustainability strategies of universal use of RDs, frequent use of RDs with occasional SDs, and universal use of SDs over the lifetime of one RD.</p> <p>Results: RDs were substantially heavier (3489 g) than SD-A (943 g) and SD-B (715.5 g). RDs were mainly metallic alloys (95 %), whereas SDs were mainly plastic polymers and resins (70-81 %). The LCA demonstrated the sustainability of RDs, with a lifecycle carbon footprint 62-82 times lower compared to the universal use of SDs (151.7 vs. 10512-12640 kg CO₂-eq) and 10 times lower compared to the occasional use of SDs (151.7 vs. 1351.6-1597.6 kg CO₂-eq). Differences were observed between SD-A and SD-B (7.9 vs. 6.6 kg CO₂-eq per endoscope). End-of-life incineration emissions for SDs were the most significant environmental contribution.</p> <p>Conclusions: Widespread adoption of SD poses greater environmental challenges, requiring a balance between infection control and environmental responsibility. Carbon footprint labelling can help healthcare institutions make sustainable choices and promote environmentally responsible healthcare practices.</p>

9. ANEXOS

Congresos

44 Congreso Sociedad Española Endoscopia Digestiva 2022, A Coruña

- Propuesta de sostenibilidad y análisis de la composición e impacto medioambiental del material fungible y colangioscopio de un sólo uso (**Presentación Oral**)



CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

La Presidenta del Comité Científico del
44 Congreso Nacional de Endoscopia Digestiva,
en nombre de la **Sociedad Española de Endoscopia Digestiva,**

CERTIFICA QUE

**Pedro López Muñoz, Rubén Martín Cabezuelo, Vicente Pons Beltrán,
Isabel Tort Ausina, Ana Vidaurre Garayo, Vicente Lorenzo-Zúñiga
García**

han participado en el **44 Congreso Nacional de Endoscopia Digestiva,**
celebrado en A Coruña del 17 al 19 de noviembre de 2022,
con su Comunicación Oral (Presentación en Mesa de Comunicaciones):

**PROUESTA DE SOSTENIBILIDAD Y ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN E
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL MATERIAL FUNGIBLE Y
COLANGIOSCOPIO DE UN SÓLO USO (ESTUDIO GREEN)**

Y para que así conste se expide el presente certificado.

En A Coruña, el 19 de noviembre de 2022.

Maite Herráiz
Presidenta Comité Científico

CO-33

Comunicaciones del Congreso publicadas con ISBN 978-84-09-45959-9 y DOI

European Society of Gastrointestinal Endoscopy Days 2022, Praga, República Checa

- Detailed material composition analysis of commonly used endoscopy instruments (**Póster**)
- Carbon footprint determination of single-use endoscope (**Póster**)



9. ANEXOS

European Society of Gastrointestinal Endoscopy Days 2023, Dublín, Irlanda

- Green proposal prospective study based on material composition analysis and life-cycle assessment of commonly-used endoscopic instruments (**Presentación Oral**)
- Environmental Footprint and Material Composition Comparison between Single-use and Reusable Endoscopes (**Presentación Oral**)



45 Congreso Sociedad Española Endoscopia Digestiva 2023, Sevilla

- Estudio comparativo de la composición estructural e impacto medioambiental de los duodenoscopios desechables y reutilizables (**Presentación Oral**).



CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

El Presidente del Comité Científico del
45 Congreso Nacional de Endoscopia Digestiva,
en nombre de la **Sociedad Española de Endoscopia Digestiva**,

CERTIFICA QUE

**Pedro López Muñoz, Rubén Martín Cabezuelo, Vicente Pons Beltrán,
Guillermo Vilariño Feltrer, Isabel Tort Ausina, Alberto José Campillo
Fernández, Vicente Lorenzo-Zúñiga García**

han participado en el **45 Congreso Nacional de Endoscopia Digestiva**,
celebrado en Sevilla, del 9 al 11 de noviembre de 2023,
con su Comunicación Oral (Presentación en Mesa de Comunicaciones):

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA COMPOSICIÓN ESTRUCTURAL E
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LOS DUODENOSCOPIOS
DESECHABLES Y REUTILIZABLES.**

Y para que así conste se expide el presente certificado.

En Sevilla, el 11 de noviembre de 2023.

DOCUMENTO FIRMADO DIGITALMENTE
<https://intranet.pacifico-meetings.com/Espacio/personas/comprobarCertificadoFirmado.xhtml?ccf=Ay890-C210630-PCA894-PDI1252-V1>

Carlos Dolz Abadía
Presidente Comité Científico

CO-36

Comunicaciones del Congreso publicadas con ISBN 978-84-09-56141-4 y DOI

BECAS Y PREMIOS

Beca de proyectos de Investigación. 44 Congreso Sociedad Española Endoscopia Digestiva 2022, A Coruña (15.000 €)

- Estudio del impacto medioambiental del utilaje en una unidad de endoscopia digestiva.



**Research Grant Award. European Society of Gastrointestinal Endoscopy Days 2023,
Dublín, Irlanda (10.000€)**

- Environmental impact from single-use endoscopy equipment: an interventional sustainability project



European Society of Gastrointestinal Endoscopy

The ESGE Research Grant 2023

is granted to

Dr. Pedro López-Muñoz

**at the Gastrointestinal Endoscopy Unit, Hospital Universitari i Politècnic La Fe Valencia in
Spain**

for the proposed study entitled

**"ENVIRONMENTAL IMPACT FROM SINGLE-USE ENDOSCOPY EQUIPMENT: AN
INTERVENTIONAL SUSTAINABILITY PROJECT"**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ian Gralnek".

Ian Gralnek
ESGE President

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Lorenzo Fuccio".

Lorenzo Fuccio
ESGE Research Committee Chair

9. ANEXOS

Innovation of the Year Award-Best Procedural Innovation. European Society of Gastrointestinal Endoscopy Days, Dublín, Irlanda

- “Green Mark”: A recyclable point on endoscopic instruments to reduce our environmental impact



Innovation of the Year Award



2023 Winners

Vicente Lorenzo-Zúñiga García

Best procedural innovation

GREEN MARK: A recyclable point on endoscopic instruments to reduce our environmental impact



Concesión de ayudas para Acciones Preparatorias Conjuntas entre el personal investigador de la Universidad Católica de Valencia y profesionales del Instituto de Investigación Sanitaria la Fe (5.000€)

- Análisis del ciclo de vida del instrumental fungible en procedimientos de endoscopia digestiva



ANEXO I – SOLICITUDES CONCEDIDAS PARA ACCIONES PREPARATORIAS UCV/IIS LA FE.

RESOLUCIÓN DEFINITIVA DEL SUBPROGRAMA DE LA CONVOCATORIA DE 2023 DE CONCESIÓN DE AYUDAS PARA ACCIONES PREPARATORIAS CONJUNTAS ENTRE EL PERSONAL INVESTIGADOR DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALENCIA Y PROFESIONALES DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN SANITARIA LA FE

ID	ACRÓNIMO	TÍTULO	IP UCV IP LA FE	NOTA	Importe Concedido (€)
AP2023-4	NONNA	aNalysing cOgnition through Natural laNguge at the early stages of Alzheimer disease	María del Carmen Moret Tatay Consuelo Cháfer Pericás	73,17	4.957,00 €
AP2023-8	Dis-Para	Dissection of MGUS Paraprotein Recognition Motifs: a path to cures and prevention programs	Elisa Oltra García Javier de la Rubia Comos	68,98	5.000,00 €
AP2023-6	MM-METAB	NMR-based metabolomics approaches in multiple myeloma progression: A step forward towards precision medicine	Antonio Plineda Lucena Leonor Puchades Carrasco	68,48	5.000,00 €
AP2023-7	MITOLIVER	Estudio de la implicación de la proteína PNPassa en el cáncer hepatocelular: biomarcador pronóstico y objetivo terapéutico	José Miguel Hernández Andreu Judith Pérez Rojas	65,98	5.000,00 €
AP2023-1	ENDOCO2	Análisis del ciclo de vida del instrumental fungible en procedimientos de endoscopia digestiva	Vicente Lorenzo-Zúñiga García Vicente Pons Beltrán	63,93	5.000,00 €
AP2023-10	VESTRAPIDIAB	Vesículas extracelulares naturales y sintéticas para el tratamiento del pie diabético	Isaías Salvador Sanmartín Santos Juan Francisco Merino	63,38	5.000,00 €