



# Trabajo de Fin de Máster

Título: Reparar, reciclar y verter un teléfono móvil, un análisis comparativo de sus impactos.

Apellidos: Gorospe Ballesteros

Nombre: Jorge

Titulación: Màster en Ciència i Tecnologia de la Sostenibilitat

Director/a: Víctor Lopez-Grimau, Eva Vidal

Fecha de lectura:



*A las personas que tengo cerca,  
que nos cuidamos aunque estemos lejos.*



## RESUMEN

Este estudio consiste en un análisis comparativo de los beneficios ambientales que supone realizar acciones de reparación y reacondicionamiento, así como de reciclaje para un teléfono móvil. La metodología utilizada para el análisis consistirá en el análisis de ciclo de vida (ACV) descrita en la norma ISO 14040 y se evaluarán comparativamente diferentes escenarios de uso y disposición de un *smartphone*. Se analizan los ciclos de vida tanto del uso del teléfono móvil como de los repuestos sustituidos y se evalúan en base a categorías de impacto como cambio climático, agotamiento de recursos fósiles y minerales, toxicidad humana, entre otras. Una parte importante de los impactos son relativos a la fabricación, pero son aún mayores los impactos asociados a la red móvil y de internet durante la etapa de uso. Una mejora de la eficiencia energética de la red de comunicaciones y actuaciones que alarguen la vida útil del teléfono reducirían significativamente los impactos.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, ACV, Teléfono móvil, RAEE, reparación electrónica, reciclaje electrónico.

This study consists in a comparative assessment of the environmental benefits that repairing and reaconditioning actions, as well as recycling actions, can bring for a smartphone. The methodology used is life cycle assesment (LCA) which is described in the ISO 14040, and in the study three different use and disposal scenarios of a smartphone will be compared. The life cycle of the use of the smartphone as well as the life cycles of the spare parts are analysed and assessed based on different impact categories such as climate change, mineral and fossil fuel depletion, human toxicity, among others. One important part of the impacts are caused by manufacturing, but the impacts of using a smartphone associated with the cellular network and the internet are even greater. Efficiency meassures in the energy needed for the use of the mobile phone together with meassures that lengthen the lifespan of the phone would contribute significantly to reduce these impacts.

Keywords: Life cycle assesment, LCA, smartphone, WEEE, electronics repair, electronic recycling.

Aquest estudi consisteix en una anàlisi comparativa dels beneficis ambientals que suposa realitzar accions de reparació i recondicionament, així com de reciclatge per a un telèfon mòbil. La metodologia utilitzada per a l'anàlisi consistirà en l'anàlisi de cicle de vida (ACV) descrita en la norma ISO 14040 i s'avaluaran comparativament diferents escenaris d'ús i disposició d'un *smartphone*. S'analitzen els cicles de vida tant de l'ús del telèfon mòbil com dels recanvis substituïts i s'avaluen sobre la base de categories d'impacte com a canvi climàtic, esgotament de recursos fòssils i minerals, toxicitat humana, entre altres. Una part important dels impactes són relatius a la fabricació, però són encara majors els impactes associats a la xarxa mòbil i d'internet durant l'etapa d'ús. Una millora de l'eficiència energètica de la xarxa de comunicacions i actuacions que allarguin la vida útil del telèfon reduirien significativament els impactes.

Paraules clau: Anàlisi de cicle de vida, ACV, Telèfon mòbil, RAEE, reparació electrònica, reciclatge electrònic.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	5
GLOSARIO DE SIGLAS .....	11
1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Fabricación de smartphones.....	13
1.2 Uso y mantenimiento de smartphones .....	16
1.2.1 Reparaciones y reacondicionamiento .....	17
1.2.2 Consumo de energía.....	18
1.3 Fin de vida útil.....	19
1.3.1 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos .....	19
1.3.2 Reciclaje.....	21
2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	24
3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	25
3.1 Objetivo principal.....	25
3.2 Objetivos secundarios .....	25
4 METODOLOGÍA.....	26
5 OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV .....	28
5.1 Objetivo.....	28
5.2 Alcance.....	28
6 ANÁLISIS DEL INVENTARIO.....	31
6.1 FABRICACIÓN.....	31
6.1.1 Altavoz superior.....	32
6.1.2 Batería de litio.....	32
6.1.3 Botones de encendido y volumen .....	32
6.1.4 Cable coaxial RF.....	32
6.1.5 Cable plano multiconexión .....	33



6.1.6	Cámara posterior .....	33
6.1.7	Cámara frontal .....	34
6.1.8	Circuito impreso principal .....	34
6.1.9	Circuito impreso inferior.....	37
6.1.10	Micrófono-altavoz inferior.....	38
6.1.11	Pantalla.....	39
6.1.12	Sensor IR y LED indicador.....	39
6.1.13	Soporte interior y carcasa de plástico .....	39
6.1.14	Tornillería .....	40
6.1.15	Transporte .....	40
6.2	USO.....	40
6.2.1	Energía .....	41
6.2.2	Productos utilizados .....	41
6.3	FIN DE VIDA ÚTIL .....	42
6.3.1	Escenario A.....	42
6.3.2	Escenarios B y C.....	42
7	EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	44
7.1	Fabricación del smartphone .....	44
7.2	Escenario A .....	46
7.3	Escenario B .....	47
7.4	Escenario C .....	49
7.5	Comparación entre los escenarios A, B y C.....	50
8	INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	53
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
10	REFERENCIAS.....	59
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	62
	ÍNDICE DE TABLAS .....	64
	ANEXO I. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL .....	65
	Fabricación .....	65
	Resultados para el escenario A.....	66
	Resultados para el escenario B.....	67

Resultados para el escenario C.....	69
ANEXO II. INVENTARIO DE CIRCUITO FLEXIBLE .....	71
ANEXO III. INVENTARIO DE CONECTORES .....	72

## **GLOSARIO DE SIGLAS**

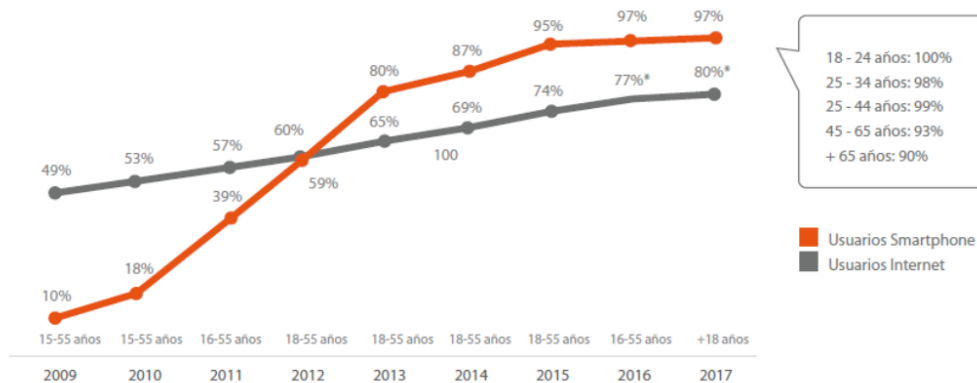
ACV	Análisis de ciclo de vida
AEE	Aparatos eléctricos y electrónicos
BOM	Listado de Materiales
DALY	Año de vida ajustado por discapacidad
IC	Circuito integrado
ISO	Organización de Estándares Internacional
LCD	Pantalla de cristal líquido
LCO	Óxido de cobalto y litio
PCB	Placa de circuito impreso
PWB	Placa de conexión impresa
RAEE	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
TIC	Tecnologías de la información y las comunicaciones

# 1 INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de la información (TIC) están cada vez más presentes en nuestro entorno, el uso del smartphone es un cambio que se ha producido recientemente, con una penetración en la sociedad de un 97% en España (ver Figura 1), y que sin embargo es un aparato de reducida vida útil en comparación con otros aparatos eléctricos y electrónicos. En los últimos años la vida útil del smartphone ha aumentado tal como se puede observar en la Figura 2, pero no queda claro si es una anomalía dentro de una tendencia a la baja, o si que las causas de este aumento tienen que ver con una mayor conciencia ambiental por parte de fabricantes o consumidores. Lo que es claro es que un aumento de la cantidad de smartphones en manos de la sociedad generará un mayor volumen de residuos en unos años, cuando estos teléfonos hayan dejado de ser funcionales. Sólo en el año 2017 el número de terminales vendidos en todo el mundo era de 1.540 millones, un dato que no ha parado de crecer desde 2007 (Gartner 2018). Un smartphone tiene un ciclo de vida que comprende tres etapas:

- Fabricación
- Uso
- Fin de vida útil

*Usuarios de Smartphone en España vs. Internautas*



**Figura 1: Usuarios de Smartphone en España. Fuente Ditrendia (2018)**

	USA	China	EU5	France	Germany	Great Britain	Italy	Spain
2016	22.7	20.2	21.6	22.2	20.3	23.4	21.6	20.5
2015	21.6	19.5	20.4	21.6	18.8	23.5	17.7	20.0
2014	20.9	21.8	19.5	19.4	18.2	22.0	18.7	18.2
2013	20.5	18.6	18.3	18.0	17.1	20.0	18.6	16.6

Figura 2. Periodo de sustitución de teléfonos móviles entre 2013 y 2015 por países, en meses. Fuente Kamtar WorldPanel ComTech (2017)

Estas tres etapas siguen existiendo para todos los productos incluso cuando se utiliza el marco de la economía circular. En economía circular típicamente se habla de retención de valor, pero para este caso, se hablará de la retención de flujos de materiales, energía y productos, mediante la reutilización y el reciclaje, para evitar la generación de residuos y la necesidad de extracción de recursos de la naturaleza. En los siguientes apartados se van a detallar los aspectos más importantes de cada una de estas etapas.

## 1.1 Fabricación de smartphones

Un smartphone es un dispositivo de la electrónica de consumo muy complejo, ya que por un lado aporta al usuario una gran funcionalidad, comparable a la de un PC, y por otro es un dispositivo portable y ubicuo, mucho más que un ordenador portátil o tablet. En este estudio se considera el producto smartphone como diferenciado de su predecesor, el teléfono celular multifunción, y aunque se podría decir que han existido productos a medio camino entre uno y otro, un smartphone es aquel teléfono que además de las funciones básicas de llamar y enviar mensajes permite la navegación por internet, el uso de Apps de terceros, almacenamiento y reproducción de música y vídeo o realizar fotografías.

La fabricación de smartphones consiste en la integración de un conjunto de componentes, como son las placas de circuitos impresos (PCB), sensores de movimiento o infrarrojos, así como sistemas electro-ópticos o la batería, por mencionar algunos. Se ha estudiado en la literatura la composición estadística de estos elementos (Singh et al. 2018), encontrando ligeras variaciones entre los teléfonos multifunción y los smartphones como se muestra en la Figura 3. La composición de estos dispositivos es diversa en cuanto a materiales, en la misma figura se muestra la composición en base a su masa de los materiales que componen los teléfonos.

Los metales más importantes de los teléfonos móviles son cobre (13%), hierro (5%), aluminio (2%), estaño (0,5%), plomo (0,3%), níquel (0,1%) y metales preciosos tales como oro (350 ppm), plata (1400 ppm) y paladio (200 ppm). Estos valores se pueden encontrar en el estudio realizado por Yu et al. (2010) en el que se analiza el contenido de los teléfonos en cuanto a masa y valor económico, así como en energía necesaria para su extracción (Figura 4), valores similares se encuentran en otros estudios (Valero Navazo, Villalba Méndez, y Talens Peiró 2014; Singh et al. 2018). El plomo se espera que se reduzca a un valor residual en pocos años, gracias a la

normativa europea que prohíbe su inclusión en productos vendidos. Además de los elementos que se han mencionado, el complejo sistema de componentes de un teléfono móvil contiene un alto número de materiales raros aunque en proporciones más bajas, la Comisión Europea ha elaborado una clasificación para determinar cuáles de éstos se consideran críticos en base a su creciente demanda para la fabricación de productos y su escasez (European Commission 2014).

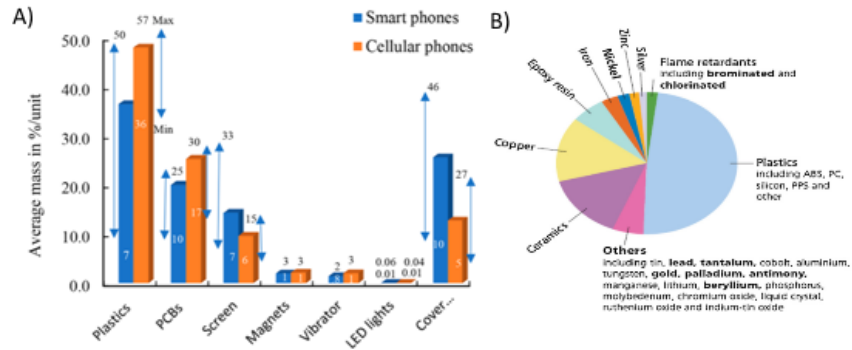


Figura 3 Descomposición de componentes del teléfonos móviles por peso, diferenciando entre teléfonos celulares y smartphones. A) componentes y B) materiales. Fuentes Singh et. al (2018) y Singhal (2005)

Average metal content and value ratio of typical mobile phones.

Element	Cu	Al	Fe	Ni	Pb	Sn	Ag	Au	Pd
Content (%)	13	2	5	0.1	0.3	0.5	0.14	0.035	0.02
Value ratio (%)	4.3	0.3	0.2	0.1	0.03	0.6	3.9	78.8	11.8

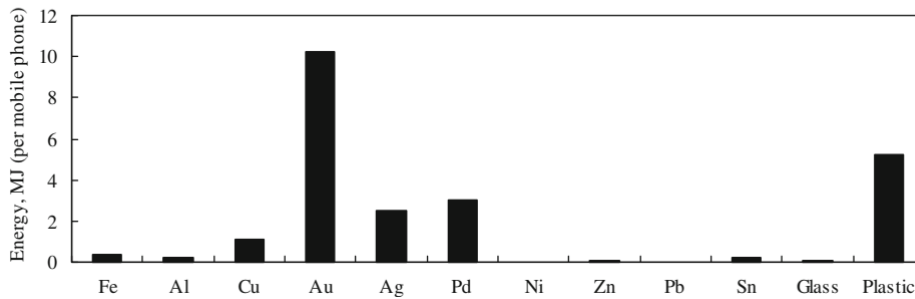


Figura 4. Composición de los metales más importantes encontrados en teléfonos móviles, en masa, precio y energía de extracción. Fuente: Yu et al. (2010)

La alta deslocalización de estos materiales y su uso intensivo en el sector de la electrónica ponen de relieve cómo se hace muy difícil la fabricación de dispositivos electrónicos de manera sostenible, ya que se incurre en altos costes de extracción y transporte para la obtención de las materias primas. En la Figura 5 se muestran las principales áreas de extracción de estos materiales en el mundo. Los materiales críticos en el sector de la electrónica son de especial importancia ya que muchos de los dispositivos que ahora se fabrican los utilizan, como se muestra en la Figura 6, y se vería afectada su continuación si estos materiales comienzan a

escasear. Esto es de especial importancia para el sector dado que las plantas de ensamblado de módulos o de fabricación de componentes como PWB, pantallas o circuitos integrados (Boyd 2012), requieren altas cantidades de recursos económicos y materiales para su puesta en marcha. A la hora de definir los materiales para un componente se consideran muchos requisitos como son la miniaturización, el bajo consumo de energía, propiedades electro-ópticas o electromecánicas, así como el coste económico, lo que puede hacer muy difícil la sustitución de unos materiales por otros.

Los materiales críticos no sólo generan incertidumbre en el futuro de las industrias electrónicas, son un problema también a nivel social y político para países con estructuras débiles de gobierno, como ocurre en la República Democrática del Congo con la extracción de coltán para obtener el tantalio. Este mineral, necesario para la miniaturización de condensadores y hacer los móviles más portables, es responsable de conflictos armados y ha tenido como consecuencia episodios devastadores en este país. También en el otro lado de la cadena de la electrónica, se produce en estos países la quema de plásticos de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) procedentes de países desarrollados, como se comentará en mayor profundidad en un apartado posterior.

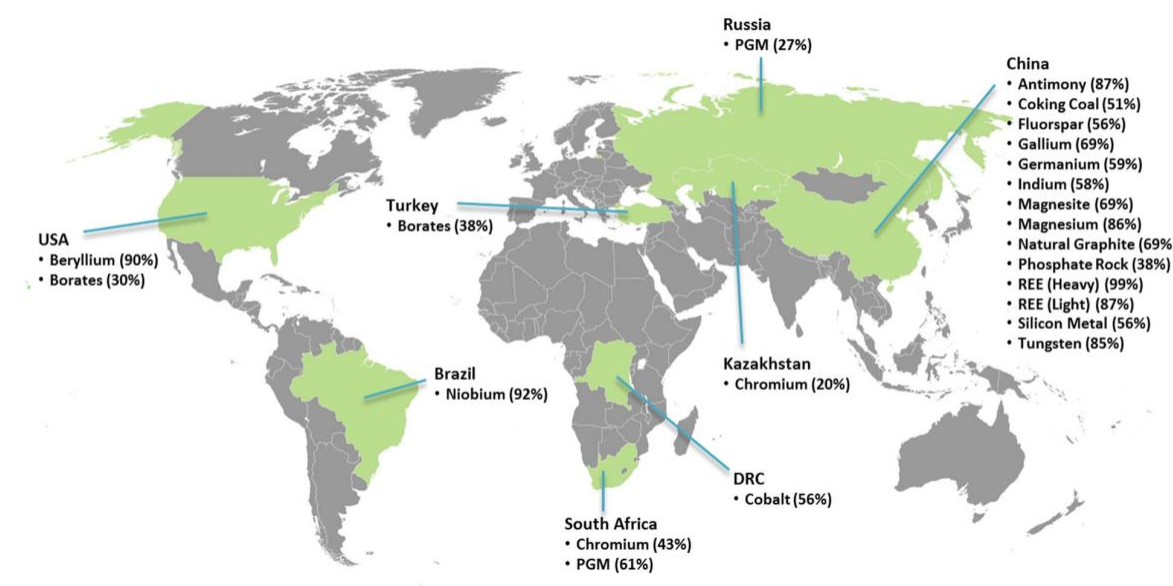


Figura 5. Localización mundial de las principales reservas de materiales críticos. Fuente: Comisión Europea (2014).

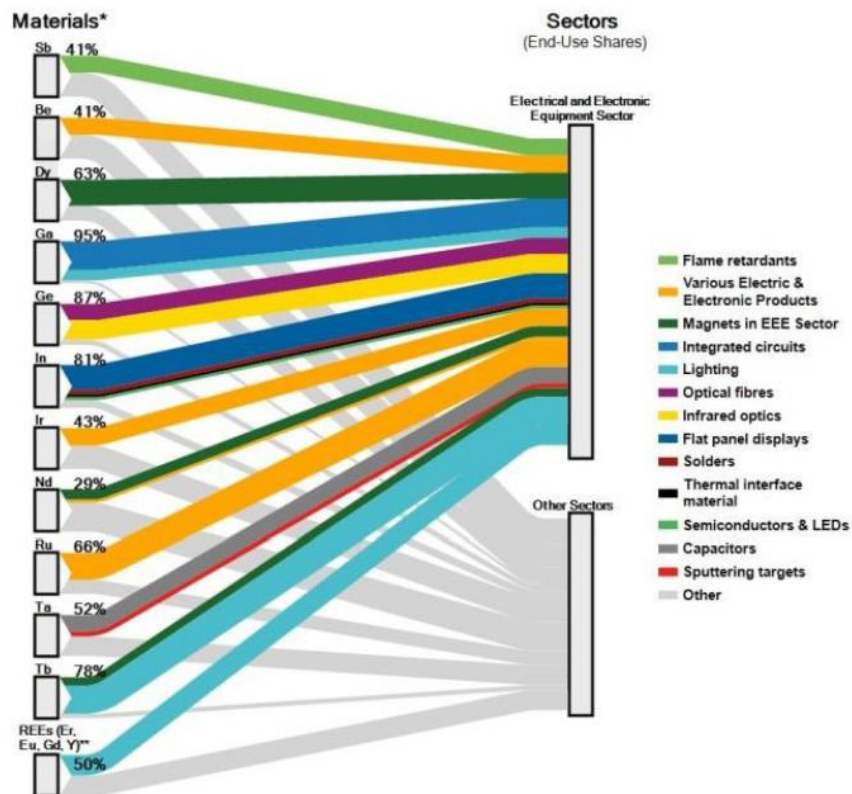


Figura 6. Diagrama de sankey de los principales materiales críticos, así como su volumen de demanda, utilizados en la industria electrónica. Fuente: Mathieux et al. (2017)

## 1.2 Uso y mantenimiento de smartphones

El uso de la tecnología móvil es cada vez más intensivo, y cada vez es más habitual encontrar a personas frente a la pantalla de su teléfono al caminar, ir en transporte público, entre los propios amigos y amigas, o compañeros y compañeras de trabajo. El nivel de dependencia en las TIC es cada vez mayor en nuestra sociedad. En Deloitte (2016) se ha elaborado un informe a partir de una encuesta realizada en el Reino Unido sobre la intensidad de uso que realizan los usuarios de los teléfonos a lo largo del día. Lo cierto es que cada vez se pasa más tiempo frente a la pantalla, y cada vez más se compaginan actividades diarias con el uso del teléfono. En la Figura 7 se muestra por porcentajes el uso que se hace del teléfono durante las actividades diarias, llama la atención que 9 de cada 10 personas lo utilizan mientras trabajan, 8 de cada 10 lo hacen entre amistades y 7 de cada 10 lo utilizan durante la cena en familia.



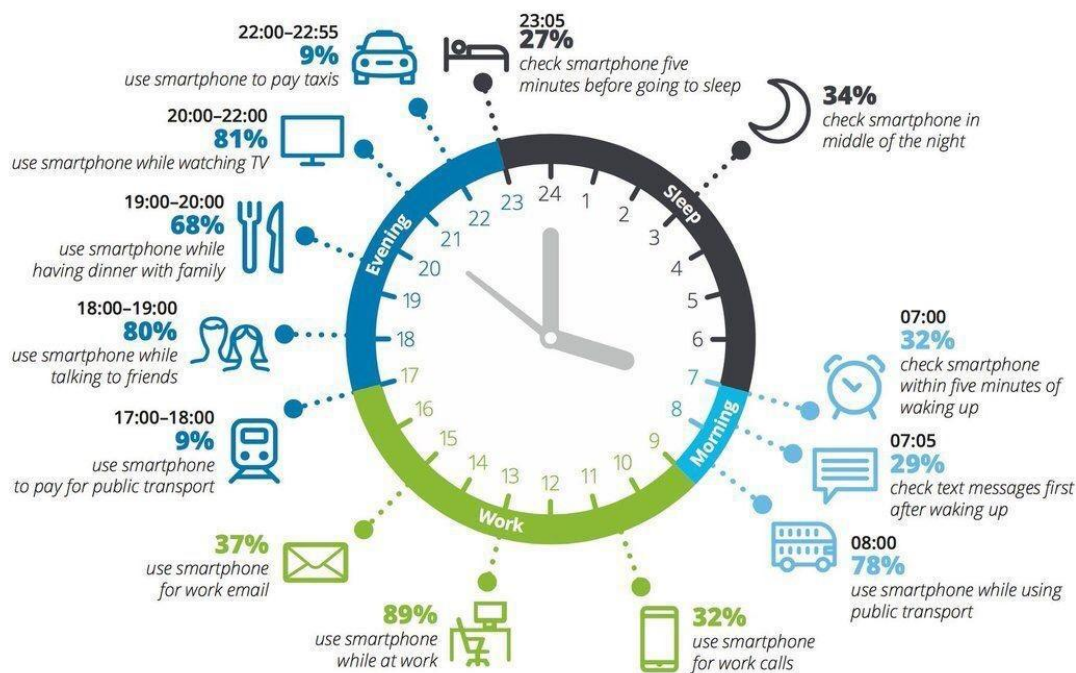


Figura 7. Un día en la vida de un teléfono. Fuente: Deloitte (2016)

Los periodos de sustitución de teléfonos móviles por parte de los usuarios durante muchos años habían ido en descenso, sin embargo en los últimos años han aumentado (ver Figura 2). Por contra, los consumidores en general prefieren no sustituir sus teléfonos con tanta frecuencia, en Austria, las personas que contestaron una encuesta esperaban al menos poder haber utilizado sus teléfonos 2,5 veces más tiempo del que los pudieron usar (Wieser, Tröger, y Hübner 2015), en China, se entrevistó a un total de 296 personas en una zona residencial y la mayor de las razones por las que sustituyeron sus teléfonos fue su mal funcionamiento, más que las ganas de tener un teléfono con nuevas prestaciones (Q. Tan et al. 2018).

Sobre el estado en el que los usuarios conservan sus teléfonos, la empresa Square Trade afirma que el 37% de las personas de Reino Unido ha dañado su teléfono en los últimos 2 años, muchos de estos usuarios no reparan sus teléfonos, con un 47% de daños en la pantalla táctil, o un 24% no pueden realizar fotografías. La empresa Gemalto aporta datos como que un 54% de los usuarios reportan una duración de la batería pobre, o que para un 47% de usuarios su teléfono se ralentiza.

### 1.2.1 Reparaciones y reacondicionamiento

La reparación y mantenimiento de teléfonos no es un sector importante, sin embargo con la introducción del paquete de medidas de Economía Circular de la Unión Europea en 2015 se espera que se le vaya dando más cabida al sector de las reparaciones. Hasta el momento el foco

siempre ha estado en las operaciones de reciclaje, ya que se trata de un sector más técnico-científico, pese a que no reporta tantos beneficios ni a los usuarios ni al medio ambiente. Los negocios de reparación son negocios que dependen en gran medida del contexto y los apoyos del sector, ya que se encuentran en un punto intermedio del ciclo de vida de los productos y en general no tienen ninguna capacidad de decisión en el diseño de los teléfonos o en la producción de repuestos. Pese a ello, diversas causas apuntan a un auge en el sector de las reparaciones, posiblemente influenciadas por una corta vida útil inicial y precios cada vez más altos de los terminales. Los negocios de reparación se ven principalmente afectados por los siguientes factores (Türkeli et al. 2019):

- Aparición de negocios informales de reparación
- Precio barato de los terminales
- Precios elevados de los componentes para las operaciones de reparación
- Dificultad creciente en la reparación de teléfonos.

En la mayoría de casos, muchos de los servicios de reparación ofrecen la posibilidad de comprar el terminal viejo para su reacondicionamiento y venta en el mercado de segunda mano. Según una encuesta de Deloitte (2018) en Holanda, un 12% de los encuestados tienen un móvil de segunda mano.

### 1.2.2 Consumo de energía

El consumo de energía asociado a los teléfonos móviles se puede dividir en 5 grandes grupos:

- El consumo propio del smartphone.
- El consumo de dispositivos del usuario como el router WiFi.
- El consumo de la infraestructura de red móvil.
- El consumo de la infraestructura de comunicaciones de internet (*backbone*).
- El consumo de los servidores y centros de datos.

Algunos autores consideran el consumo del router, el consumo de la red móvil y el *backbone* como parte del mismo elemento (Corcoran y Andrae 2013) mientras que otros autores discriminan el router y la red móvil (Suckling y Lee 2015; Ercan et al. 2016), pero agregan a la infraestructura de red el consumo de los servidores y centros de datos (ver Figura 8). Todos ellos apuntan a que el consumo de la red, generalmente asignado a los elementos de las infraestructuras por unidad de datos consumida, es mucho mayor que la energía consumida por el teléfono. Ello lleva a que los impactos ambientales de la etapa de uso sean muy altos en relación al resto de etapas, aunque no sean impactos que dependan directamente del fabricante del dispositivo.

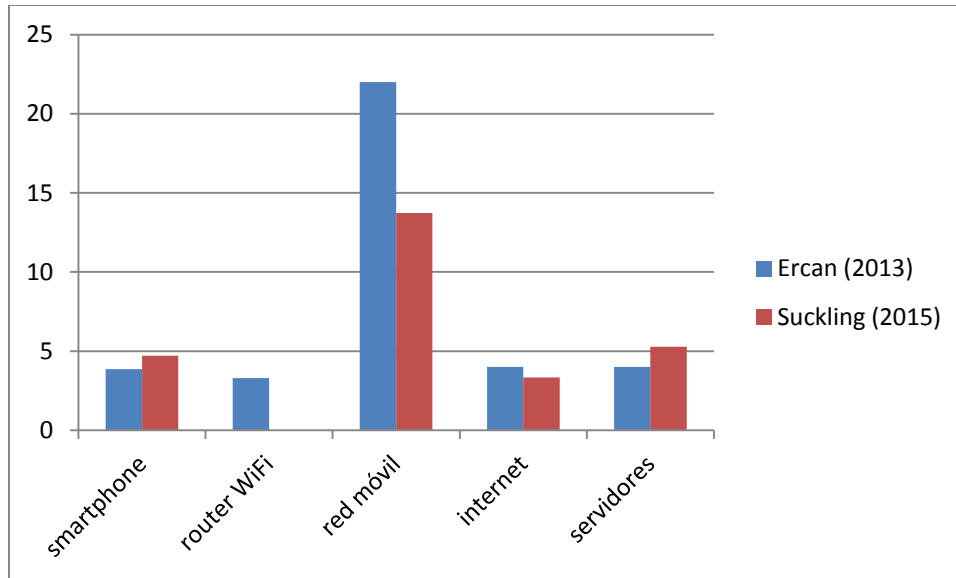


Figura 8. Comparativa de los consumos asociados a la fase de uso de un smartphones en kWh para los estudios de Ercan et al. (2016) y Suckling et al. (2015). En el caso de los internet y los servidores, Ercan et al. agregan este valor, se ha dividido el valor entre las dos categorías. Para los valores de Suckling et al. el valor de conversión utilizado es de 0,6 kg CO<sub>2</sub> eq./kWh.

### 1.3 Fin de vida útil

Los RAEE son un problema creciente en Europa y el resto del mundo, los niveles de basura electrónica no han parado de subir desde que se hacen estimaciones sobre sus cantidades, además están repartidas de manera muy desigual por continentes. El informe realizado por Baldé et al. (2017) muestra que Oceanía lidera el grupo en cantidad de residuos por habitante con 17,3 kg/hab. al año, le sigue Europa con 16,6 kg/hab., América tiene un promedio de 11,6 kg/hab. pero caben esperar grandes diferencias entre América del Norte y del Sur, a mucha distancia se encuentra Asia, con 4,2 kg/hab., y por último África con 1,9 kg/hab. Sin embargo la calidad de los datos empeora para estos dos últimos países no es tan buena. Típicamente los RAEE se han medido por su masa, pero en diversos artículos queda documentado que los impactos ambientales para este tipo de residuos son muy diferentes para una misma cantidad de productos (Canetta et al. 2018). Métricas como la huella de carbono o la toxicidad de los productos pueden hacerlos más comparables entre sí, y superarían en calidad de información la medición de RAEE por su masa.

#### 1.3.1 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Existen muchos escenarios de residuos electrónicos para su disposición final, sin embargo, en esta etapa no se consideran los RAEE cuyos usuarios han dejado de utilizar y almacenado, puesto que se asume que en algún momento habrán de ser desechados. Esto es algo habitual en smartphones, en Holanda una encuesta (Deloitte 2018) muestra que el 46% de los encuestados han guardado el teléfono antiguo, un dato un 5% mayor que el del año anterior. En China el dato es aún mayor, ya que hasta un 60% de los usuarios almacenan su teléfono móvil en desuso en un

cajón (Q. Tan et al. 2018). Este mismo estudio arroja datos sobre las causas por las que se sustituyen los teléfonos, en un 60% se debe a que el teléfono no funciona correctamente (ver Figura 9).

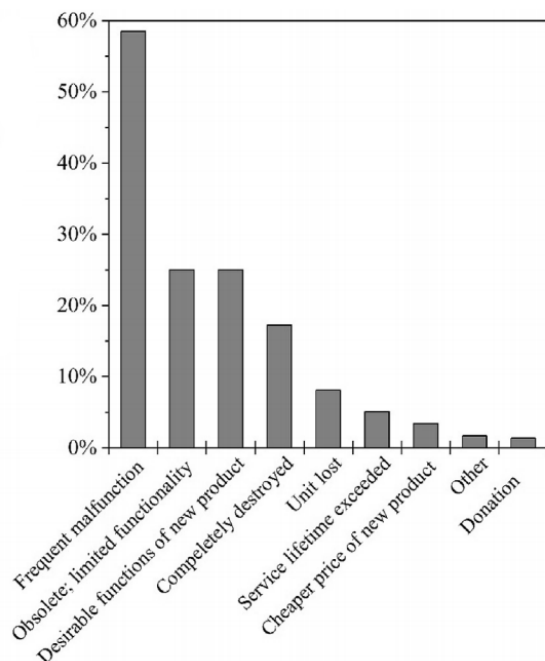


Figura 9. Causas de reemplazo de los terminales móviles en China. Fuente: Tan et al. (2018)

Los escenarios de disposición final se clasifican en tres principales:

- Circuito de residuos oficial
- Circuito de residuos mixtos
- Escenarios fuera de los circuitos oficiales de residuos

El último caso es especialmente preocupante ya que un gran volumen de residuos son exportados fuera de la Unión Europea, y principalmente a países en vías de desarrollo. Desde que la Convención de Basilea entró en vigor en 1992 es ilegal la exportación de residuos a países en vías de desarrollo, sin embargo se ha criticado la práctica de marcar lo que se considera un residuo como "equipos usados", en teoría material susceptible de ser reparado o reciclado en países con menos poder adquisitivo. Un estudio en Nigeria aporta datos sobre la cantidad de material que llega a su puerto con esta etiqueta (Odeyingbo, Nnorom, y Deubzer 2019), de Europa llegan ya sea dentro de vehículos "roll-on roll-off" o en contenedores un total de casi 46000 toneladas de "equipos usados" al año. Según el artículo, en torno a un 19% de los equipos no eran funcionales, lo que genera una gran cantidad de residuos en un país con poca capacidad para absorber los ya generados por el propio país.

Sin embargo, es aún más alarmante la problemática cuando se depositan en los puntos de reciclaje oficiales, y acaban siendo exportados a estos países, algo que viola gravemente la

Convención de Basilea. El estudio *Holes in the Circular Economy* de la Red de Acción de Basilea (Puckett, Brandt, y Palmer 2018) detalla cómo un 6% de residuos que se monitorizaron una vez se desecharon en puntos oficiales de recogida. De los 314 productos que se dispusieron en puntos para su recogida selectiva hubo 19 que acabaron en países como Nigeria, Ghana, Tanzania, Ucrania, Pakistán, Tailandia y Hong Kong. Es más, en 2013, la OCU ya alertaba de este mismo problema cuando realizaron un estudio similar (OCU 2013), de 16 aparatos monitorizados por GPRS, sólo 4 acabaron en una planta oficial de reciclaje.

La normativa europea ha ido evolucionando a lo largo de estos años desde que en 2003 se aprobara la directiva 2002/96/EC. Esta directiva fijó por entonces el principio de responsabilidad extendida del productor (EPR), y que para el año 2006 la recogida selectiva alcanzara el objetivo de 4 kg/hab. y año de RAEE, sin embargo este objetivo se consideró muy bajo si el volumen de residuos es ya de 16,6 kg/hab y año en Europa. Por esta razón en 2012, con la directiva 2012/19/UE, se fijaron los objetivos de al menos una recogida selectiva del 65% de los productos puestos en el mercado para 2016, un aumento del 5% de la tasa de reciclado del material recogido así como trazabilidad del material electrónico usado y exportado a terceros países para evitar la emisión de basura electrónica por este mecanismo.

En el caso de depositarse en el circuito de residuos mixtos, se considera muy difícil que el producto descartado pase al primer circuito, y en general acabará en un vertedero o en una incineradora.

Por último, se ha puesto en tela de juicio que la lógica de EPR tenga un sentido práctico que contribuya a mejores prácticas sostenibles y reduzca el impacto de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

### 1.3.2 Reciclaje

El reciclaje de RAEE es una fase posterior a su recolección selectiva, no todos los RAEE acaban en una planta de reciclaje. Esto se debe a múltiples factores, en cierto modo la competencia que existe en el mercado de residuos puede contribuir a que se incurran en malas prácticas como sacar del circuito oficial de residuos RAEE y se realicen transacciones con quien dé más dinero por ellos. En otros casos, el coste de reciclar residuos de aparatos eléctricos y electrónicos va fijado a los precios de las materias primas recuperadas, que en ocasiones no salen rentables.

En el caso de los teléfonos móviles, el reciclaje comienza por la separación de los elementos más contaminantes, como las baterías. Estos elementos deben separarse y tratarse por separado, en general la operación que se realiza es una trituración mecánica en un líquido desactivador, el litio es altamente peligrosos y puede dar lugar a explosiones como ocurrió en una planta de reciclaje de baterías en Hamsphire. Según la empresa Umicore, de Bélgica, los materiales recuperados de baterías son principalmente el cobalto y también níquel. Sin embargo no son materiales excesivamente críticos o caros y la información sobre su reciclaje efectivo es ambigua, pese a que en la literatura se describen muchos procesos por los que estas baterías pueden ser recicladas (Velázquez-Martínez et al. 2019; Pagliaro y Meneguzzo 2019) no se tienen datos de hasta qué

punto las baterías que incumben a los smartphones, las de óxido cobáltico de litio (LCO), se reciclan en la práctica.

En el reciclaje de los teléfonos móviles hay un consenso más amplio, en cuanto a su reciclaje y las materias primas que se pueden extraer. Como se ha mencionado, la presencia de metales preciosos en este tipo de residuos hacen atractivo su procesamiento para recuperar materias primas (Khaliq et al. 2014). En general los procesos de reciclaje se dividen en dos grandes grupos:

- Hidrometalurgia
- Pirometalurgia

Los procesos hidrometalúrgicos son capaces de extraer diferentes metales en soluciones metálicas generalmente de  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  o  $HCl$ . Las ventajas que tienen es la de que son procesos altamente controlados y eficientes, sin embargo necesitan un preproceso mecánico que exponga las superficies metálicas para su disolución en un baño.

Los procesos pirometalúrgicos son los más extendidos para el reciclaje de RAEE, puesto que son más económicos y tienen mejores tasas de recuperación de metales preciosos. El cobre y el plomo son susceptibles de ser refinados y un posterior procesado da lugar a la obtención de metales preciosos. La vía pirometalúrgica implica que los residuos se queman a altas temperaturas y se obtiene un refinado de los materiales por la reducción de los óxidos. Para esta reducción se puede utilizar coque, aunque resulta más económico utilizar los propios plásticos de los RAEE, por lo que estos plásticos no pueden ser recuperados.

En los procesos industriales prácticos se utilizan una combinación de todos estos procesos, los procesos de las empresas Umicore (Bélgica), Noranda (Canadá), Rönnskär (Suecia) son algunos ejemplos de este tipo de reciclaje. Por ejemplo Umicore utiliza dos procesos pirometalúrgicos y un proceso hidrometalúrgico para el refinado de diferentes metales como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 10.

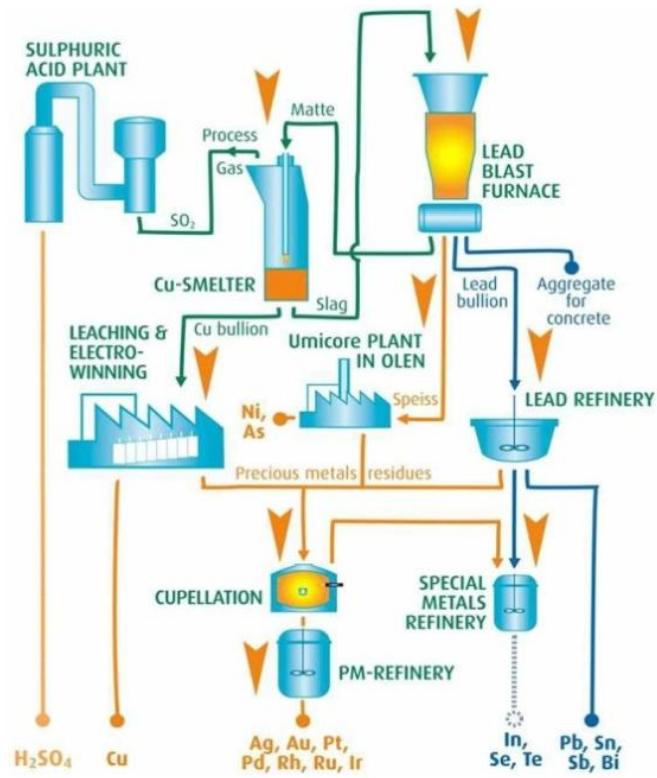


Figura 10. Diagrama de procesos de la empresa Umicore para el reciclado de RAEE. Fuente: Khaliq et al. (2014)

## 2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Este estudio pretende contribuir a los pocos estudios de análisis de ciclo de vida de smartphones que se basan en analizar los beneficios ambientales de la extensión de vida útil a través de las reparaciones. Está claro que siempre va a ser mejor reparar y reutilizar que reciclar pero gracias a la metodología de ACV se van a poder cuantificar estos beneficios. Se han realizado muchos estudios de ACV en electrónica y más concretamente en teléfonos móviles, algunos de ellos no se considerarían smartphones desde el punto de vista de que su funcionalidad está limitada (SMS, llamadas y sólo algunas funciones multimedia), por lo que aunque su impacto sea bajo en comparación con el de un smartphone su funcionalidad puede no ser comparable (Singhal 2005; K. C. N. Tan 2005).

Algunos de los estudios de ACV tienen un enfoque *Craddle-to-Craddle* (Frey, Harrison, y Billett 2008), otros no mencionan que etapas del ciclo de vida están incluidas o no explican bien el final del ciclo de vida (Canetta et al. 2018; Suckling y Lee 2015), o se hacen asunciones como la correcta disposición de los teléfonos como único escenario final (Güvendik 2014). En otros casos no se realiza una comparación entre escenarios de disposición final (Ercan et al. 2016).

No hay estudios que comparen escenarios en los que un teléfono que se repara sucesivas veces, considerando los impactos de dichas operaciones de reparación o mantenimiento, otro escenario en el que se vaya sustituyendo el teléfono ante el primer problema y se recicle el anterior, y otro en el que en la misma situación el teléfono deshechado se vierta a vertedero. Cruz y Sotelo et al. (2017) sí que consideran distintos escenarios para una vida útil mayor o menor de un teléfono, pero este teléfono no es un smartphone, y por otro lado la extensión de vida útil parece arbitraria pues no hay operaciones de reparación o mantenimiento asociadas a dicha extensión. (Proske, Clemm, y Richter 2016) realizan el estudio del Fairphone 2 en 2 escenarios, uno sin reparaciones y otro en el que se realizan operaciones de reparación, pero no se hace una comparación entre escenarios de disposición final.

Por último, recalcar que este estudio se realiza sin un acuerdo con el fabricante, lo que tiene limitaciones en cuanto a que no se ha contado con la información específica de componentes y materiales del smartphone. Por este mismo motivo, este estudio puede servir como herramienta para los consumidores que tampoco cuentan con esta información a día de hoy cuando compran un producto. La obtención de los datos se ha realizado por desensamblaje y se ha escalado por masa o por dimensiones cada uno de sus componentes.



## 3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

### 3.1 Objetivo principal

Realizar un análisis de ciclo de vida de un teléfono móvil en 3 escenarios, comparando las situaciones de disposición a vertedero, reciclaje del teléfono y sucesivas operaciones de reparación y mantenimiento para su reciclaje al final de su vida funcional. Se analizarán las ventajas e inconvenientes de cada escenario y se compararán entre sí a partir de resultados cuantitativos.

### 3.2 Objetivos secundarios

- Evaluar si se pueden realizar estudios de ACV sin la información del fabricante, identificando componentes y realizando las estimaciones oportunas para la etapa de inventario. Se contrastarán los resultados obtenidos con otros estudios.
- Analizar a qué etapas del ciclo de vida de un smartphone se le imputan mayores impactos ambientales y cómo se podría contribuir a mitigarlos.
- Desarrollar nuevos modelos de materiales y procesos para componentes del smartphone que no aparecen inventariados en la base de datos utilizada.

## 4 METODOLOGÍA

La metodología de análisis utilizada que se realizará será la de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), según está contemplada en las normativas ISO 14040/2006 y ISO 14044/2006. Para el desarrollo del análisis se utilizarán las bases de datos incluidas en las herramientas software más completas de ACV, para este estudio la base de datos utilizada es la de Ecoinvent en la versión 3.7 y la herramienta software de análisis es SimaPro.

El ACV se divide en varias fases y para cada una de ellas se deben seguir los pasos indicados desde la norma. Para mayor clarificación de estas fases se adjunta la Figura 11, donde se indican estas fases y su relación, una breve descripción del objetivo de cada fase se describe a continuación:

- **Objetivo y alcance:** En esta fase se describen generalidades como el objetivo del estudio y una descripción del sistema, donde se detalla la unidad funcional y los límites del sistema.
- **Análisis del inventario:** Debe recopilar detalladamente los procedimientos para la obtención de los datos y los cálculos realizados para su obtención.
- **Evaluación del impacto:** La evaluación del impacto es la que relaciona unas categorías de impacto definidas, cuantificadas mediante indicadores, y el análisis del inventario previo.
- **Interpretación:** La fase de interpretación debe relacionar principalmente el objetivo del estudio con los resultados del inventario y los impactos obtenidos en las otras fases, así como extraer conclusiones y recomendaciones a partir de estas conclusiones.

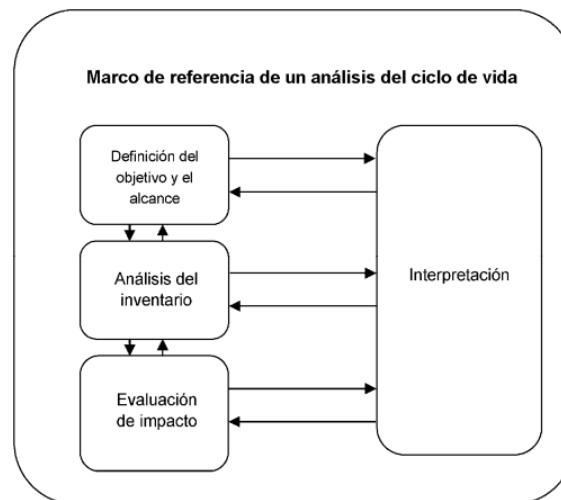


Figura 11. Fases del análisis de ciclo de vida. Fuente: ISO 14040

Los aspectos más interesantes de la metodología ACV recogidos por Hauschild et al. (2018) son que toma una perspectiva de ciclo de vida del producto, cubre un amplio rango de categorías de impacto ambiental, es cuantitativo y está basado en el método científico. Sus limitaciones se

reducen al análisis y la obtención de estos resultados por categorías ambientales, pero no es una herramienta que sirva para la toma de decisiones, o que venga a sustituir campos como la economía ambiental o la evaluación de riesgo químico, ya que no considera el producto en un entorno geolocalizado, ni tiene en cuenta aspectos económicos, sociales o políticos. Además deben matizarse bien el alcance y las limitaciones, así como la fuente de datos y su calidad para no dar lugar a equivocaciones cuando se contrasten estudios.

Las categorías de impacto se dividen en dos tipos, Midpoint y Endpoint. Las categorías Midpoint tienen valores absolutos relacionados con impactos directamente asociados a los flujos del ciclo de vida. Estas categorías aparecen en el primer grupo de la Figura 12. Los impactos Endpoint hacen referencia a estas mismas categorías, pero se trasladada su impacto a tres áreas de protección, salud humana, medida en años de vida ajustados por discapacidad (DALY), ecosistemas, medidos en especies por año, y recursos medidos en dólares ajustados por inflación al año 2013 (ver Figura 12). ReCiPe permite la utilización de tres métodos, igualitario (E), jerárquico (H), e individualista (I). Para este trabajo se ha considerado el H como el más relevante, que toma en consideración los impactos de los próximos 100 años.

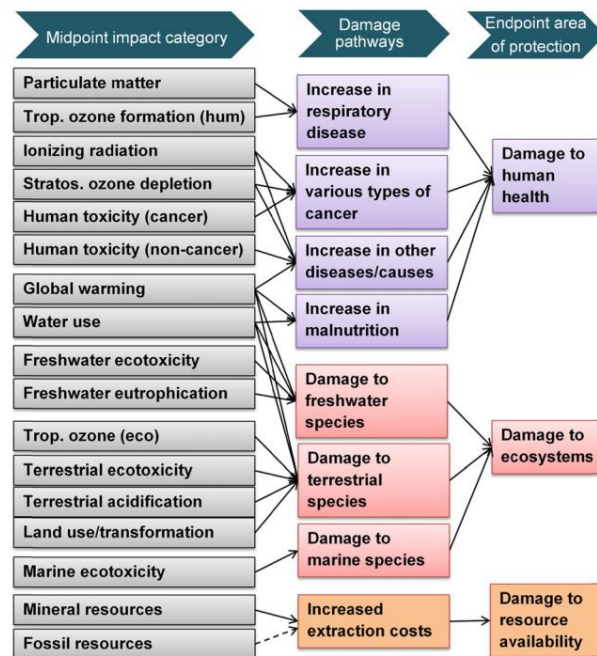


Figura 12. Relación entre las áreas de protección y las categorías de impacto para ReCiPe 2016. Fuente: Huijbregts et al. (2017)

## 5 OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV

### 5.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es el de comparar los impactos ambientales de la utilización de un smartphone, durante un periodo de tiempo de 5 años, en tres escenarios:

- Escenario A: Fabricación, uso y disposición del teléfono a vertedero.
- Escenario B: Fabricación, uso y disposición del teléfono a sistema de reciclado.
- Escenario C: Fabricación, uso con reparación del teléfono hasta su obsolescencia tecnológica estimada y disposición del teléfono a sistema de reciclado.

La unidad funcional de este estudio es el uso de un smartphone durante 5 años. Se entiende por smartphone aquel teléfono que además de las funciones básicas de llamar y enviar mensajes permite la navegación por internet, el uso de Apps de terceros, almacenamiento y reproducción de música y vídeo o realizar fotografías, en general tiene una pantalla táctil y posibilidades de comunicación Bluetooth, WiFi y recepción GPS. 5 años es el tiempo que se estima puede durar un teléfono que aún siendo funcional a nivel *hardware*, ha pasado a ser obsoleto, como se explicará en la fase de inventario.

El objetivo de este estudio consiste en la evaluación de impacto ambiental de estos tres escenarios y puede servir para asignar un valor cuantitativo a las operaciones de mantenimiento y reparación, así como al reciclaje en el ámbito de la telefonía móvil.

Para la realización del estudio no se cuenta con el apoyo del fabricante del producto ni información sobre su BOM. El tipo de estudio realizado es por desensamblado, lo que conlleva un alto grado de incertidumbre como opinan algunos autores (Proske, Clemm, y Richter 2016), a lo que se suma la falta de información al desconocerse las marcas de muchos de sus componentes. El objetivo no es por lo tanto un estudio que sirva de comparación con otros estudios de su ámbito, pero sí puede aportar una idea comparativa entre los escenarios que se manejan para este caso, y orientar a los consumidores de telefonía a que tomen decisiones más sostenibles durante el uso y la disposición final del teléfono. Decisiones que incurran en un menor impacto ambiental, lo que supone una mitigación del impacto.

### 5.2 Alcance

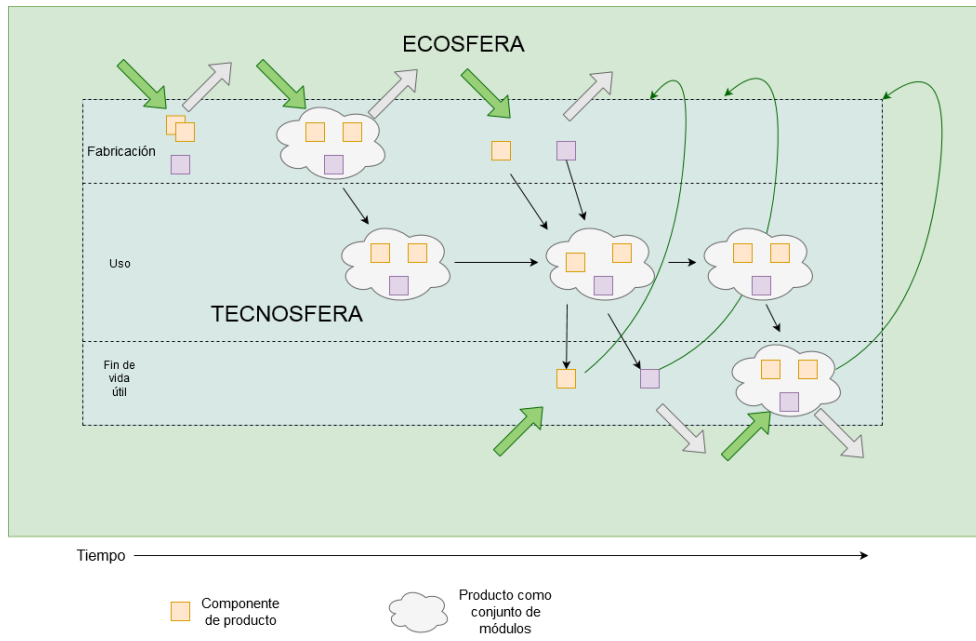
Para describir el alcance de este ACV se van a detallar los aspectos más importantes para cada etapa del análisis, fabricación, uso y escenario de disposición final.

En la etapa de fabricación se han tenido en cuenta las entradas de materiales y de energía necesarias para la fabricación del teléfono, así como las entradas de materiales adicionales, emisiones y residuos generados durante la fabricación, incluyendo también la infraestructura asociada a dicha fabricación. Los componentes y elementos que contiene el smartphone son los que se han estimado que contiene al realizar una inspección del mismo, y la información obtenida se ha basado en fabricantes de productos iguales o similares a los presentes en el teléfono móvil bajo estudio. Se sobreentiende que la mayoría de smartphones tienen unos módulos básicos que lo componen iguales, aunque pueden variar en masa, prestaciones e impacto ambiental, en algunos casos estos módulos podrían no existir. Los costes de transporte de cada material a la siguiente etapa de producción se han estimado, pero pueden no corresponder con el caso real del producto.

En la etapa de uso se ha considerado los insumos energéticos tanto del teléfono como de la infraestructura de la red de comunicaciones asociados. No se ha considerado sin embargo los costes ambientales de la construcción de la infraestructura de comunicaciones, tampoco se han considerado productos íntimamente ligados al uso del teléfono como una funda protectora, el cargador, los auriculares o las tarjetas SIM y SD, estos elementos en ocasiones son opcionales, y su ciclo de vida puede no estar tan relacionado con el del teléfono. Por ejemplo un usuario puede conservar la tarjeta SIM o SD de un móvil que va a desechar y utilizarla en uno nuevo, y seguramente el cargador de un móvil antiguo siga funcionando al final de la vida útil del teléfono, pero también es cierto que no es raro extraviar este componente, sobre todo en viajes, y se ha de comprar un cargador nuevo cuando el móvil está todavía en funcionamiento. Además de que en la compra de muchos smartphones viene incluido, por lo que mucha gente acaba teniendo más de uno en desuso.

Para la etapa de fin de vida útil, para los diferentes escenarios se han obtenido los datos de Ecoinvent o de bibliografía relacionada, puesto que no se ha contado con datos primarios de la industria. Para el reciclaje de las baterías de litio se ha estimado que no se reciclan, debido a los precios de los minerales primarios que pueden no hacer competitivas estas operaciones, se ha considerado por tanto que las baterías sólo se tratan para su descontaminación en el caso que se recicle el teléfono o este repuesto.

El modelo del estudio considera el smartphone como la suma de sus módulos, lo que en la práctica favorece la reparación, especialmente para las reparaciones en las que se sustituyen repuestos, el ACV permite modelar el ciclo de vida de los repuestos, por lo que es una metodología muy potente a la hora de promover la modularidad de los productos. La Figura 13 ilustra la idea de modularidad del producto smartphone que se va a considerar en este estudio, a lo largo de su ciclo de vida.



**Figura 13. Ciclo de vida de producto y repuestos asociados al ciclo de vida.**

## 6 ANÁLISIS DEL INVENTARIO

A la hora de realizar el inventario de ciclo de vida se ha dividido el teléfono en diferentes módulos, que pueden asociarse a repuestos de un fabricante para posibles reparaciones en las que estos elementos hardware deben ser sustituidos, siguiendo el modelo de la Figura 13. El inventario se ha dividido en las diferentes etapas del producto: fabricación, uso y fin de vida útil. Para cada uno de los escenarios el inventario se modifica en algunos aspectos, partiendo del escenario A, la fabricación es igual para los 3 escenarios, el uso es igual en A y B, pero en C se incluyen los ciclos de vida de los repuestos que se sustituyen; y en el tratamiento de residuos el escenario A consiste en vertido a vertedero, mientras que los escenarios B y C consisten en el reciclaje del teléfono, en el caso C también queda inventariado el reciclaje de los repuestos utilizados durante su uso.

### 6.1 FABRICACIÓN

La división modular del teléfono se ha realizado a partir del desensamblaje del mismo, la Tabla 1 muestra esta división modular del teléfono, así como su masa. A su vez esta división puede subdividirse en módulos más pequeños, pero se entiende que tanto a nivel de gestión de los repuestos como simplificación en su reparación estos son los módulos de interés que componen el teléfono en su totalidad.

Modulo	Masa (g)
Altavoz superior	0,484
Batería de litio	31,234
Botones de encendido y volumen	0,166
Cable coaxial RF	0,164
Cable plano multiconexión	0,321
Cámara posterior	0,65
Cámara frontal	0,186
Circuito impreso principal	9,07
Circuito impreso inferior	1,867
Micrófono-altavoz inferior	0,609
Pantalla	47,459
Sensor IR y LED indicador	0,285
Soporte interior y carcasa de plástico	16,34
Tornillería	0,512
Otros	0,132
<b>TOTAL</b>	<b>109,5</b>

Tabla 1. Composición de los diferentes módulos del smartphone analizado y su respectiva masa

Cabe destacar aquí que en el caso de los repuestos, la fabricación es análoga y queda recogida en este apartado.

Se ha comprobado que el fabricante especifica una masa de 113 gramos para este dispositivo, luego se valida la descomposición al apreciar un error bajo, que puede deberse a la variabilidad en la fabricación de los propios componentes.

### 6.1.1 Altavoz superior

Este altavoz es el más pequeño de los dos encontrados en el teléfono, se ha escalado por masa su composición a partir del Micrófono-altavoz inferior, ya que cumplen funciones idénticas salvo por parámetros como la potencia, o que se trata de un elemento sólo de salida de señal.

Su masa es de 484 mg.

### 6.1.2 Batería de litio

La batería de litio es de tipo ión de litio con cátodo LCO, por sus siglas en inglés. El modelo utilizado para la batería es el que aparece en la base de datos de Ecoinvent para una batería de 31,234 gramos.

### 6.1.3 Botones de encendido y volumen

Los botones de encendido y volumen se componen de 4 elementos que se muestran en la siguiente tabla. A cada uno de los elementos se les han asignado materiales y procesos de la base de datos de Ecoinvent, que corresponderían a un modelo de fabricación cada elemento. La masa total del módulo es de 166 mg.

Elemento	Masa (mg)	Fuente de datos
Cable plano	60,2	Desarrollo propio. Explicado en el anexo II
Accionadores metálicos	6,5	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Cinta aislante	73,9	Ecoinvent
Apantallamiento de aluminio	25,4	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.

Tabla 2. Composición y fuente de datos de los botones de encendido y volumen del smartphone

### 6.1.4 Cable coaxial RF

El cable coaxial es un cable que conecta una señal de radiofrecuencia proveniente de una antena con la PCB principal. Para el inventario de ciclo de vida se ha utilizado un cable de conexión de la base de datos de Ecoinvent, ya que se estima que su composición y fabricación es similar.

La masa del cable coaxial es de 0,164 g.



### 6.1.5 Cable plano multiconexión

El cable plano multiconexión es un tipo de cable, que en este caso conecta las dos placas de circuito impreso entre sí. Este tipo de componente tiene la particularidad de que es flexible, el modelo de inventario se ha realizado de acuerdo con el Anexo II y Anexo III a partir de las listas de materiales y del informe de sostenibilidad de una empresa del sector, el tipo de asignación para el producto del volumen de recursos consumidos por el fabricante es económica.

Elemento	Masa (mg)	Modelo
Cable plano	268,2	Desarrollo propio. Explicado en el anexo I
Conectores	3	Desarrollo propio. Explicado en el anexo II
Pasta de soldadura	13,2	Ecoinvent
Elementos rígidos de aluminio	39,9	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
<b>TOTAL</b>	<b>324,28</b>	

Tabla 3. Composición y fuente de datos del cable plano multiconexión

La energía utilizada en la fabricación es de 2 Wh, se ha estimado como la correspondiente al parámetro de 43,2 Wh/m<sup>2</sup> de circuito impreso obtenida de Ecoinvent. La pasta de soldadura se obtiene también a partir de Ecoinvent, con un parámetro de 806 mg/m<sup>2</sup>.

### 6.1.6 Cámara posterior

La cámara se ha inventariado a partir de sus elementos que se muestran en la Tabla 4, una imagen de referencia de cómo se han obtenido estos elementos puede verse en el Anexo III. El conjunto de elementos a partir de los cuales se ha inventariado este componente se describe en la tabla siguiente.

La energía asociada a este componente es la de un ensamblaje manual de sus elementos. Para el circuito rígido-flexible que a supuesto que se trata de los elementos PWB compuestos por una parte de PWB rígida, y otra parte flexible descrita en el Anexo II. Este elemento y sus componentes pasan por un proceso de soldado como el descrito en el circuito plano multiconexión escalado a las dimensiones del circuito.

Componente	Elemento	Masa (mg)	Fuente de datos
Flex Rigid PCB	Wafer IC	42,1	Boyer et al. (2012)
	Rigid PCB	34,5	Ecoinvent
	Flex PCB	33,2	Desarrollo propio descrito en el anexo I
	Capacitor	0,45	Ecoinvent
	Solder Paste	5,3	Ecoinvent
Filtro óptico	-	20,6	
Lentes	-	42,7	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Apantallamiento de cobre	-	38,5	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Carcasa de aluminio	-	275,6	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Soportes de plástico	-	153,1	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Separadores de papel	-	1,1	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Separador de plástico	-	4,8	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
<b>TOTAL</b>	-	<b>649,7</b>	

Tabla 4. Composición de componentes y elementos de la cámara de fotos trasera del smartphone

### 6.1.7 Cámara frontal

Para el inventario de la cámara frontal se ha realizado un escalado por masa de la cámara trasera, aunque en este caso dicha estimación podría dar lugar a errores puesto que la carcasa de esta cámara es de plástico y no de aluminio, dada la calidad de los datos se ha considerado aceptable esta estimación. La masa de este módulo es de 185,5 mg.

### 6.1.8 Circuito impreso principal

Para el inventario del circuito impreso se ha realizado una estimación de la masa de sus componentes a partir de una identificación visual que se muestra en la Figura 14, la masa de la placa impresa de conexión (PWB) se ha estimado en base a sus dimensiones y la base de datos de Ecoinvent. En la Tabla 5 se muestra una relación entre la masa de sus componentes y la fuente de datos del inventario.

Componente	Masa (mg)	Fuente de datos
PWB	5495,9	Ecoinvent
Conectores	1596	Desarrollo propio. Anexo I
Condensadores	270	Ecoinvent
Condensadores de tántalo	49,6	Ecoinvent
Resistencias	33,8	Ecoinvent
Inductores choke	1,54	Ecoinvent
Inductores	46,7	Ecoinvent
LED	17,6	Ecoinvent
Circuito integrado lógico	990	Ecoinvent
Circuito integrado memoria	561	Ecoinvent
Circuito integrado sin encapsular	5,6	Boyer et al. (2012)
Diodos	5,46	Ecoinvent, como componente pasivo
Cristal de cuarzo	11,1	Ecoinvent, como componente pasivo
Otros componentes	8,3	Ecoinvent, como componente activo
Pila de botón	51,6	Ecoinvent, como pila alcalina
Apantallamientos de aluminio	2514,2	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent
Pasta de soldar	203,5	Ecoinvent
<b>TOTAL</b>	<b>11,861</b>	

**Tabla 5. Composición del componente PCB principal, a partir de los componentes electrónicos de montaje superficial, el soldante y la PWB que lo componen.**

La masa experimental del PCB es de 11,58 gramos y la estimación a través de la identificación de sus partes es de 11,86 gramos, con una desviación del 2%. Las estimaciones de masa de los componentes se han basado en especificaciones de fabricantes, esta metodología, en ausencia de datos del fabricante concreto puede dar lugar a error, sin embargo se ha considerado que la desviación de masa es aceptable, y la asignación de materiales de inventario se ha realizado con datos de Ecoinvent. Un desoldado de los componentes para su peso implicaría por un lado pérdida de material al haber componentes realmente pequeños, y por otro podría dar lugar a error si se contabilizan restos del elemento soldante. Se tiene en cuenta que al no disponer del BOM de fabricación se puede incurrir en errores para encapsulados similares, como condensadores de tántalo y diodos. Esta identificación de componentes es la mostrada en la Figura 14, cuya leyenda de colores se puede ver en la Tabla 6.

La cantidad de pasta de soldadura y de energía en el proceso de ensamblaje se ha estimado en base al área de la PCB, utilizando los parámetros de Ecoinvent.

Se tiene en cuenta que el modelo de Ecoinvent para condensadores de tántalo es de tipo *through-hole* y el que se encuentra en el PCB es de tipo SMD, por lo que habrá un mayor contenido de la aleación de los contactos y menor contenido del tántalo que es un material crítico. Para los circuitos integrados se utilizan tres modelos, para los circuitos integrados sin encapsular se utiliza el modelo de Boyd (2012), que se considera la mejor estimación tomando como unidad de

referencia el área del chip, para encapsulados de tipo memoria se utiliza el modelo de circuito integrado tipo memoria de Ecoinvent, y para el resto de integrados el circuito integrado de tipo lógico. Esto puede dar lugar a desviaciones ya que la unidad central de procesamiento será más intensiva energéticamente, al hablar de una tecnología de silicio de menores dimensiones que otras menos complejas. Sin embargo, según Boyd no hay grandes diferencias al tratarse de economías de escala cada vez más eficientes.

Los cristales de cuarzo se han modelado como componentes pasivos, aunque el modelo encontrado se oriente más a elementos de silicio como diodos o transistores, no se han encontrado datos para modelar los cristales de cuarzo como componentes. Otros componentes encontrados se han identificado como componentes activos generales y se ha estimado su peso a partir del volumen. La muestra el proceso de identificación de componentes a partir de las imágenes de las PCB queda reproducido en la Figura 14, con su correspondiente leyenda (ver Tabla 6).

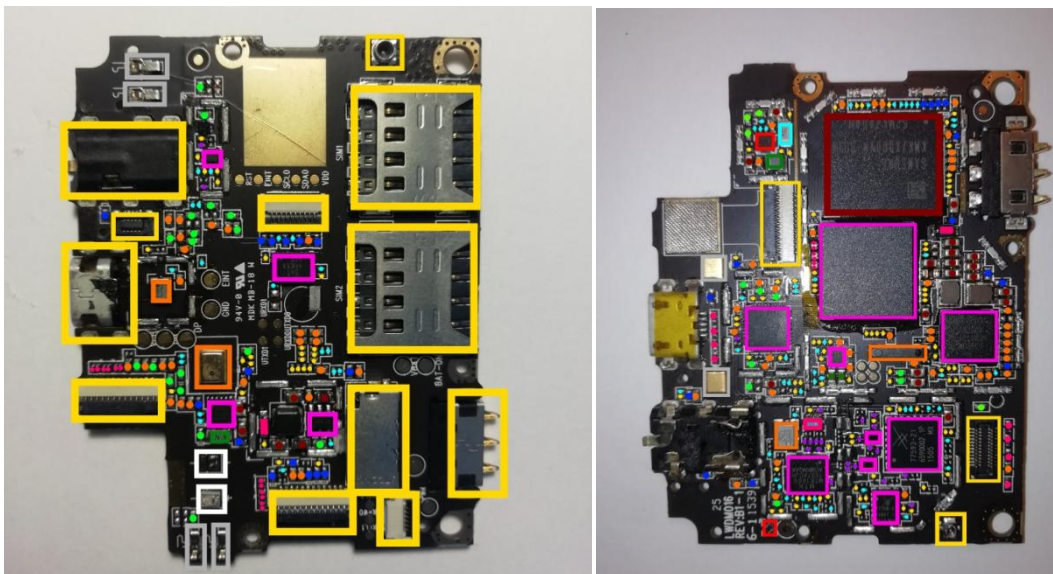


Figura 14. Identificación de componentes de la placa de circuito impreso principal.

Tipo de componente	Forma	Color	Identificación
Condensadores	Punto	amarillo	condensador cerrensa 01005
	Punto	naranja	condensador cerrensa 0402
	Punto	granate	condensador cerrensa 0603
	Punto	azul	condensador de tde tns 0402
Resistencias	Punto	turquesa	resistencia 01005
	Punto	verde	resistencia 0402
	Punto	verde oscuro	resistencia 0603
Inductores	Punto	morado	inductor tipo choke 01005
Diodos	Punto	magenta	diodo / componente pasivo sin especificar
Circuitos integrados	Cuadrado	blanco	LED
	Cuadrado	magenta	IC
	Cuadrado	rojo	Wafer IC
	Cuadrado	granate	IC de memoria
Otros componentes	Cuadrado	amarillo	conector
	Cuadrado	gris	Contacto mettacto
	Cuadrado	naranja	Cristal de cuarzo

Tabla 6. Leyenda de identificación de componentes de la PCB principal y la PCB inferior.

### 6.1.9 Circuito impreso inferior

El inventario de este módulo es análogo al anterior, la peculiaridad de este módulo es que contiene el motor de vibración del teléfono. Este componente contiene tungsteno según la empresa Fairphone, sin embargo no se ha encontrado información sobre materiales y consumos empleados en la fabricación de este tipo de componentes, por ello se ha modelado como un motor eléctrico de la base de datos de Ecoinvent, y se ha escalado por masa. En la tabla siguiente se muestra la composición del conjunto de este módulo.

Componente	Masa (mg)	Fuente de datos
PWB	1177,1	Ecoinvent
Conectores	29,4	Desarrollo propio. Anexo II
Condensadores	5,4	Ecoinvent
Condensadores de tántalo	3,2	Ecoinvent
Resistencias	5,72	Ecoinvent
Inductores choke	0,07	Ecoinvent
IR buttons	1,72	Ecoinvent, as LED
Motor vibrador	634,6	Ecoinvent
Pasta de soldar	69	Ecoinvent
<b>TOTAL</b>	<b>1926,2</b>	

Tabla 7. Composición del componente PCB inferior, a partir de los componentes electrónicos de montaje superficial, el soldante y la PWB que lo componen.

En este caso se han excluido también los elementos de contacto con la carcasa al igual que en el apartado anterior. La desviación entre la masa experimental y la masa inventariada a partir de los componentes del PCB es de un 3%. Se consideran los mismos parámetros de consumo de energía que en el caso de los procesos de soldadura vistos anteriormente, para un área de PWB de 856,8 mm<sup>2</sup>. En la Figura 15 se muestra la identificación de componentes análogo al caso de la PCB principal, aunque en este caso hay muchos menos componentes. Para la leyenda de componentes de la imagen ver Tabla 6.

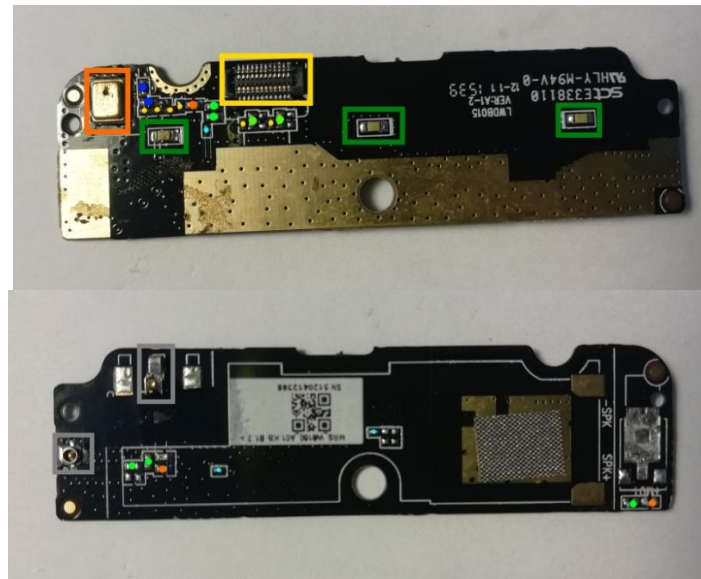


Figura 15. PCB inferior con los componentes identificados marcados en color, nótese que el motor vibrador fue desoldado para su medición por separado.

### 6.1.10 Micrófono-altavoz inferior

El modelo considerado para el inventario de este componente se ha basado en el desensamblado del mismo y su composición a partir del ensamblado de sus partes. La Tabla 8 muestra la descomposición de dicho módulo en sus diferentes partes que se han modelado en el programa de análisis.

Elemento	Masa (mg)	Fuente de datos
Carcasa de plástico	144,4	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent
Bobina de cobre	42,1	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent
Imán permanente	1384,7	Ecoinvent.
Membrana de film y aluminio	19,7	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent.
Contactos metálicos	18,5	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent
<b>TOTAL</b>	<b>609</b>	

Tabla 8. Descomposición del micrófono-altavoz en sus componentes, masa correspondiente y datos de inventario.

### 6.1.11 Pantalla

La pantalla, con una masa de 47,05 gramos, tiene 4 componentes, un soporte de plástico (12 g), la unidad de retroiluminación o *backlight* (11,27 g), el vidrio protector (11,89 g) y el LCD (11,89 g). Todos estos elementos se han modelado a partir de Ecoinvent a partir de su masa. La masa del vidrio y del LCD se ha asignado un 50% a cada una después de haber sido medida, puesto que no se pudo separar en el desensamblaje.

### 6.1.12 Sensor IR y LED indicador

El sensor infrarrojo (IR) y el LED indicador (RGB) forman un módulo con una base de circuito flexible. El sensor IR se utiliza para la detección de proximidad del usuario. Este módulo se ha modelado en base a los elementos que lo componen, un resumen de esta composición puede verse en la Tabla 9.

Componente	Elemento	Masa (mg)	Fuente de datos
Circuito impreso flexible	FPC	67,4	Desarrollo propio. Ver anexo II
	Solder Paste	9,5	Ecoinvent
	LED	64	Ecoinvent
	Aluminum stiffener	1,9	Ecoinvent
	IC wafer	1,1	Boyer et al. (2012)
	Connector	3,8	Desarrollo propio. Ver anexo III
	Capacitor	0,1	Ecoinvent
Soportes de plástico	-	101,6	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent
Protecciones de goma	-	35,4	A partir de materiales y procesos de Ecoinvent
<b>TOTAL</b>		<b>284,8</b>	

Tabla 9. Composición del módulo asociado al sensor IR para la detección de proximidad y el LED indicador del smartphone.

El circuito impreso se ha modelado del mismo modo que otros circuitos flexibles descritos en este trabajo, este modelo queda reflejado en mayor detalle en el Anexo II. La energía requerida para el ensamblaje del circuito es de 0,48 Wh, esta cantidad, así como la de pasta de soldadura, se estima a partir de las dimensiones del circuito.

### 6.1.13 Soporte interior y carcasa de plástico

Aunque podrían considerarse por separado ya que, sobre todo la carcasa, pueden dañarse y ser susceptibles de reparaciones, para este estudio se han incluido como un único módulo para simplificar el modelo de fabricación ya que no se considera su deterioro y por tanto los resultados obtenidos no varían.

La carcasa de plástico y el soporte interior de plástico se han considerado como un plástico de tipo ABS por ser un plástico duro que cumple con las características del material observado. Se ha modelado en base a materiales y procesos de Ecoinvent y su peso es de 9,43 g para la carcasa y 6,91 g para el soporte interior, haciendo un total de 16,34 g.

Estos elementos incluyen algunos elementos metálicos, como contactos para verificar el cierre de la carcasa, y otros de tipo plástico transparente como la ventana de la cámara trasera o el *flash*, sin embargo se han obviado por no ser abundantes y por la complejidad de su extracción.

#### 6.1.14 Tornillería

La tornillería se ha modelado como un elemento torneado de acero inoxidable a partir de procesos de Ecoinvent. Se considera que el material extraído se aprovecha para su reciclaje, por lo que tiene una alta eficiencia de materias primas, no se ha considerado un posterior proceso de separación de la materia prima y el material lubricante que ayuda en el torneado de la pieza en el reciclaje. El peso final de los tornillos es de 512,2 mg.

#### 6.1.15 Transporte

Se ha estimado que los productos viajan desde China hasta el punto de venta en España realizando un tramo del transporte por carretera y la mayor parte del trayecto por transporte marítimo. En este apartado se han diferenciado las rutas marítimas de los smartphones y de los repuestos, ya que se considera que estos últimos pueden tardar más y no es necesario que atraviesen el canal de Suez, el transporte se ha estimado utilizando la página de Sea Routes ([www.searoutes.com](http://www.searoutes.com)).

	Transporte por carretera (km)	Transporte marítimo (km)	Días
Smartphones	1100	15027	27-28
Repuestos	1100	22885	41-42

Tabla 10. Transportes asociados a los productos considerados en el ACV, desde la salida de la fábrica hasta el punto de venta.

## 6.2 USO

Durante la etapa de uso del producto se ha estimado una vida útil inicial del teléfono antes de que se vuelva inservible igual al dato de sustitución para España aportado por Kamtar WorldPanel (2018), que es de 1,67 años. Para esta vida útil inicial, se ha estimado que un teléfono móvil es susceptible de ser reparado durante un periodo de tiempo hasta que llega a una obsolescencia tecnológica de tipo *software* al cabo de 5 años.

Los datos de los que se dispone para la estimación de esta obsolescencia tecnológica son escasos, Whatsapp ha anunciado recientemente que deja de funcionar en teléfonos Android 2.3.7 o inferior y iOS 8 o inferior, y recomienda actualizar a versiones Android 4.0.3 o iOS 9 o superiores. Se ha visto que teléfonos con lanzamientos de hasta el año 2013 dejarán de funcionar con esta App, por lo que pueden resultar inservibles. Este dato daría una obsolescencia de 6 años a los teléfonos, que aunque sólo toma como referencia una aplicación móvil, WhatsApp, y



muchas otras quedan obsoletas mucho antes para la mayoría de teléfonos, se toma este dato como relevante debido al uso extensivo de la aplicación y en ausencia de otros datos. Por otro lado, la mayoría de personas esperan una duración de sus terminales móviles mayor, de acuerdo con los resultados de una encuesta en Austria, la durabilidad esperada era 2,5 veces superior a la real. Esto daría una duración esperada de 4,1 años para una duración real de 1,67 años. Haciendo la media entre los 6 años identificados anteriormente y el dato de 4,1 años, se estima que un móvil queda obsoleto tecnológicamente a los 5 años, sin que una reparación aporte ninguna utilidad adicional al smartphone.

### 6.2.1 Energía

Durante la unidad funcional de 5 años de uso del teléfono móvil, el consumo de electricidad debido al uso es el descrito por Suckling et al. (2015) ya que cuenta con datos más recientes y mejor explicados que Ercan et al. (2016), sin embargo se ha tomado el dato de consumo de WiFi de este último. El factor de conversión utilizado ha sido 0,6 kg CO<sub>2</sub>/kWh, para mayor comprensión ver Figura 8. En la Tabla 11 se muestran los consumos utilizados, se considera que el uso de energía en los tres escenarios es el mismo.

Tipo de consumo energético	Anual (kWh)	En 5 años (kWh)
Móvil	3,87	19,35
Router WiFi	3,3	16,5
Red Móvil	22	110
Internet	10,6	53

Tabla 11. En esta tabla se muestran los consumos considerados en la etapa de uso del smartphone. En la tercera columna se considera el consumo total de cada fracción de consumo de energía.

### 6.2.2 Productos utilizados

El consumo de recursos es diferente para cada uno de los escenarios, el resultado de los productos utilizados es el que se muestra en la Tabla 12, los datos de averías de los teléfonos considerados en el escenario C se han basado en datos aportados por empresas aseguradoras de teléfonos móviles, Gemalto y Square Trade ya mencionados. El cálculo se ha realizado mediante la ecuación (6.1), en la que R es la proporción de teléfonos con un defecto concreto en un periodo de tiempo T. El resultado es la cantidad de reparaciones en 5 años, o la tasa de reparaciones.

$$\frac{R}{T} * 5$$

(6.1)

El valor de sustitución en el caso de las baterías es el aportado por Gemalto, donde R es la gente que considera que su batería no dura lo suficiente, un 54%, y T es la tasa de reemplazo del teléfono, 1,67 años. Para el caso de las pantallas y las cámaras, Square trade afirma que aquellos

usuarios con un móvil que adquirieron hace menos de dos años (T), en un 16% tienen averiada la pantalla, y en un 8,3% no pueden realizar fotografías. Se asume que en cada caso, una sustitución de la pantalla y de la cámara solucionaría el problema.

Se asume que el tiempo de muestra del estudio (2 años) es el periodo en el que la muestra del estudio decide deshacerse del teléfono, de no ser así, la fórmula (6.1) habría que multiplicarla por un factor de corrección superior a 1.

Producto	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Teléfono móvil	3	3	1
Batería	-	-	1,5
Pantalla	-	-	0,42
Cámara	-	-	0,21

Tabla 12. Tasa de sustitución de cada producto considerado en el ciclo de vida para un periodo de tiempo de 5 años.

### 6.3 FIN DE VIDA ÚTIL

En este apartado se van a considerar dos subapartados, el considerado para el escenario A, y el considerado para los escenarios B y C, de reciclaje.

#### 6.3.1 Escenario A

En este escenario se considera que al finalizar la vida útil del teléfono móvil se deposita en un vertedero, se ha modelado a partir de la base de datos de Ecoinvent.

#### 6.3.2 Escenarios B y C

En estos escenarios se considera que el teléfono o las partes sustituidas deben introducirse en un sistema de reciclaje. El proceso de reciclaje es el siguiente:

- Desensamblaje manual
- Reciclaje de cada uno de los módulos siguiendo dos esquemas: batería y resto de partes del teléfono.

Para el desensamblaje se tiene en cuenta que cada teléfono lleva un tiempo de desensamblaje de 1 minuto, se extrae la batería y se procesan por separado la batería y el resto del teléfono. En el caso del reciclaje de repuestos (escenario C), se considera también una operación de desensamblaje para la sustitución de dicho repuesto. Se ha estimado una asignación de infraestructura a cada teléfono para una planta que funciona durante 25 años funcionando 8 horas al día, 5 días a la semana.

El reciclaje del resto de módulos del teléfono se realiza siguiendo el esquema propuesto por Valero Navazo et al. (2014), que se ha ajustado para la recuperación de las materias primas contenidas en el teléfono.

Existen muchas posibilidades de reciclaje a nivel de procesos en la literatura como los descritos por Pagliaro y Meneguzzo (2019) o en la revisión de los autores Velázquez-Martínez et al. (2019), pero a diferencia del resto del smartphone, los materiales que se extraen son principalmente el cobalto, el níquel y el litio, y no está claro que en la práctica se puedan obtener de una forma económicamente viable. En este estudio la batería de litio se procesa mediante el tratamiento de este tipo de residuos de Ecoinvent.

## 7 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

La evaluación de impacto ambiental se ha realizado utilizando las métricas del método de evaluación ReCiPe, que ofrece una cantidad variada de categorías de impacto y se considera como una versión combinada y actualizada de los métodos CML y Eco-Indicator 99. Los indicadores Midpoint aportan información sobre diferentes impactos ambientales de la actividad humana. Estos indicadores, así como las unidades en las que se expresan son:

<b>Indicador</b>	<b>Unidades</b>
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq
Agotamiento abiótico	kg oil eq, kg Cu eq, m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O
Ecotoxicidad	kg 1,4-DCB
Eutrofización	kg N eq, kg P eq
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq
Uso del suelo	m <sup>2</sup> a crop eq
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq
Material particulado	kg PM <sub>2.5</sub> eq
Oxidación fotoquímica	kg NO <sub>x</sub> eq

En Endpoint las unidades para cada categoría cambian, y se pueden agrupar los resultados en tres categorías que son salud humana (DALY), ecosistemas (especies/año) y recursos (USD base 2013).

La metodología ACV permite analizar cada una de las etapas de producto, por lo que se va a detallar en primer lugar el resultado del análisis para la fabricación. Posteriormente se muestran los resultados para los tres escenarios considerados en el ciclo de vida (A, B y C). Tanto para la fabricación como para los escenarios se mostrarán los resultados Midpoint y Endpoint, y por último se realizará una comparación entre los escenarios. Estos resultados aparecen en este capítulo de manera ilustrativa, para el resultado de los valores obtenidos referirse al Anexo I.

### 7.1 Fabricación del smartphone

Como se ha detallado es interesante realizar el análisis de la fabricación del smartphone de manera modular, y que estos módulos correspondan a los posibles repuestos que se deban sustituir a la hora de realizar alguna operación de reparación o reacondicionamiento del smartphone. La fabricación se divide en los módulos descritos en la Tabla 1.

El resultado del análisis aporta los siguientes valores relativos de cada módulo para cada categoría de impacto. En este punto del análisis, las unidades son valores absolutos asociados a la categoría de impacto, por lo que se muestran los impactos porcentuales de cada una para cada módulo. En la Figura 16 se puede observar que los mayores impactos son los relativos a la PCB principal, esto es debido a que componentes como circuitos integrados o la propia PWB son elementos intensivos en recursos. la pantalla parece tener el mayor de los impactos de eutrofización marina y en radiación ionizante. El resto de componentes tienen impactos relativos más bajos. En este apartado no se están considerando los impactos de la etapa de disposición final, solo se considera la fabricación, lo que seguramente mitigue los impactos relativos de la batería. La huella de carbono de la fabricación es de 5,75 kg CO<sub>2</sub>.

Los resultados de impactos Endpoint para la fabricación del smartphone serían los mostrados en la Figura 17. Se puede observar que el elemento de mayor impacto es la PCB principal, los resultados normalizados dan una mayor importancia a la salud humana, que es donde además destaca con mayor proporción aún la PCB principal.

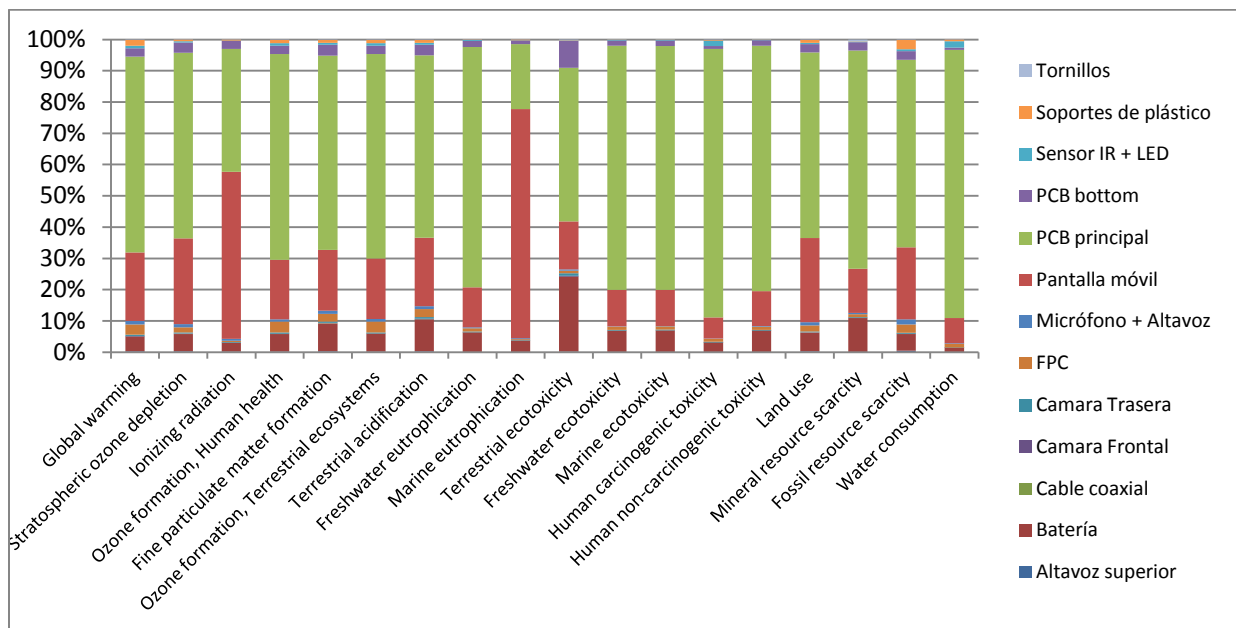


Figura 16. Impactos relativos por categorías Midpoint de la fabricación del smartphone.

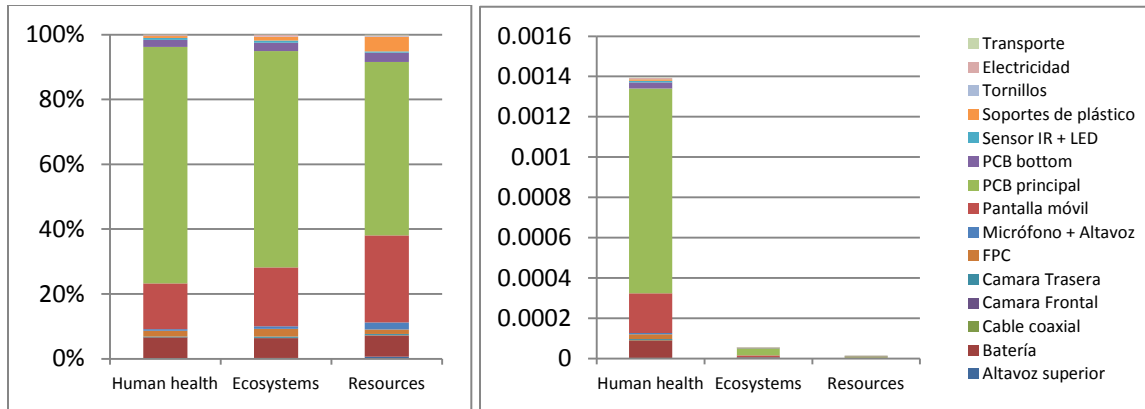


Figura 17. Impactos por categorías Endpoint de la fabricación del smartphone. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.

## 7.2 Escenario A

En el escenario A se considera que al final de la vida útil de cada teléfono utilizado, un total de 3, durante 5 años, estos se depositan en un vertedero. Sería el resultado de haber depositado el móvil en el circuito de residuos mixtos, del que sería muy difícil que se extraiga como ya se ha comentado. Los mayores impactos de este ciclo de vida corresponden a la fabricación y al uso de la red móvil 3G. Los impactos asociados a la fabricación destacan en las categorías de eutrofización, agotamiento de recursos minerales, toxicidad humana así como ecotoxicidad. La energía asociada al uso, y especialmente la red móvil tiene un impacto importante en las categorías de cambio climático, reducción de la capa de ozono, acidificación terrestre o generación de material particulado fino, entre otras. En cualquier caso, la fracción de uso del móvil supera en impactos a la de fabricación. En la Figura 18 pueden verse una gráfica con los valores relativos de cada categoría de impacto.

Para os resultados Endpoint, el grueso de los impactos los aporta la energía de la red móvil, como muestra la Figura 19. La mayoría de estos impactos normalizados son para la salud humana, a mucha distancia de las categorías de ecosistemas o recursos.

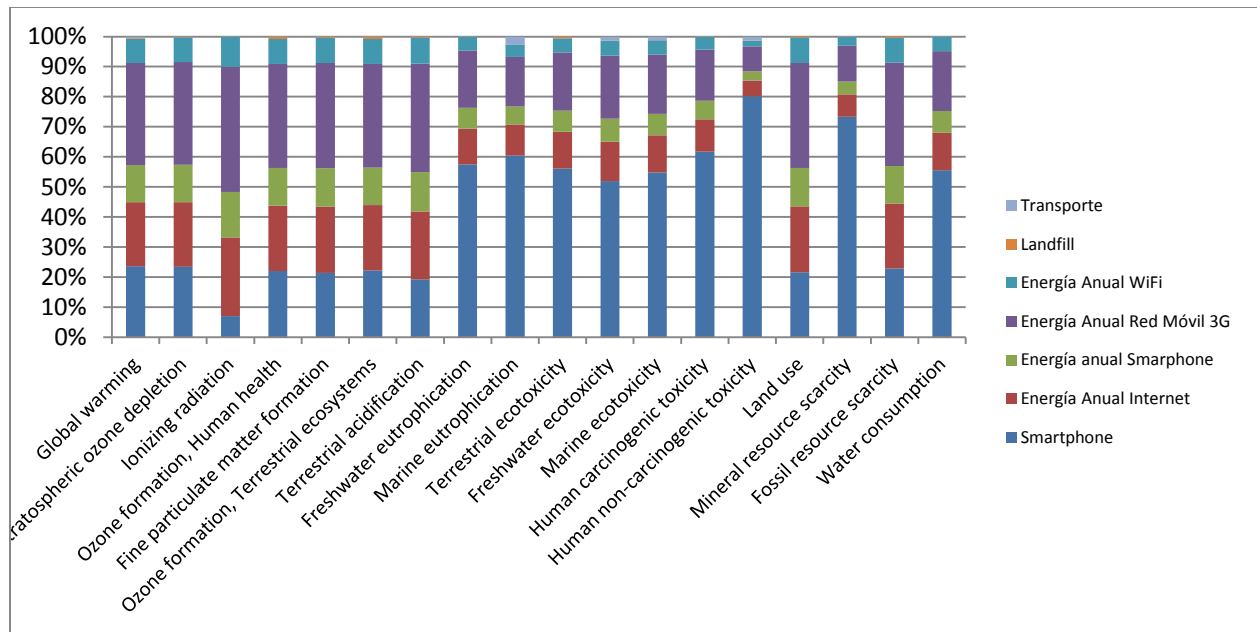


Figura 18. Impactos relativos de las categorías Midpoint del escenario A.

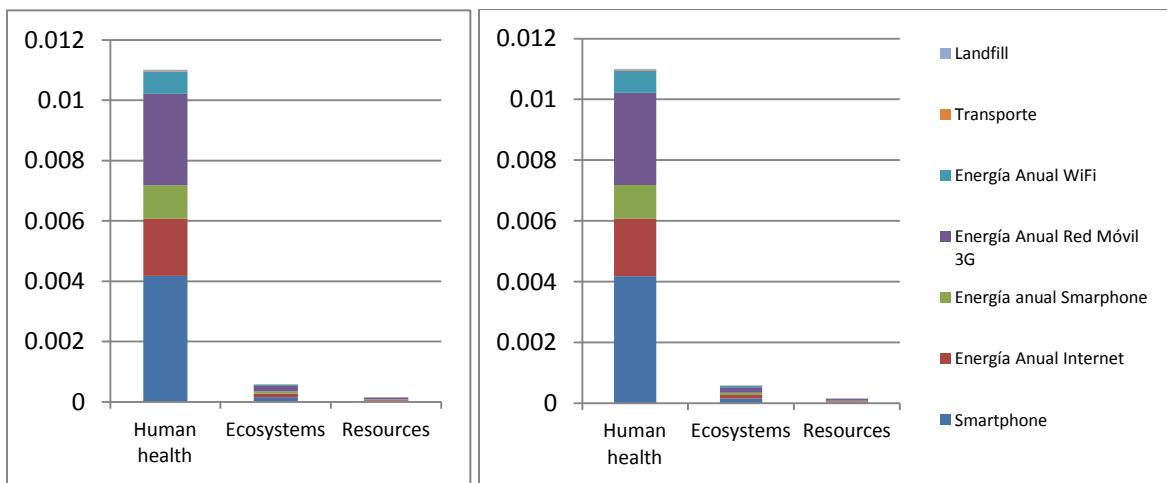


Figura 19. Impactos por categorías Endpoint del escenario A. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.

### 7.3 Escenario B

En este escenario se considera que tras su utilización durante 5 años, los 3 smartphones son reciclados. Puede verse como la contribución del reciclaje tiene un impacto negativo para las diferentes categorías, por lo que mitiga el impacto al obtener materias primas que se habrían obtenido con un impacto ambiental mayor. Las principales mitigaciones de impacto se dan en las categorías de toxicidad humana no cancerígena, agotamiento de recursos minerales y en ecotoxicidad marina y de agua dulce. El reciclado de estos productos tiene una mitigación del

impacto de entre un 20% y un 35% en los mejores casos. Para mayor detalle sobre los resultados se puede ver la Figura 20.

Los resultados Endpoint sin embargo no apuntan a unos beneficios tan cuantiosos al realizar el reciclaje de los smartphones, apenas se llega al 13% de la mitigación de impacto de la mayor de las categorías, que sigue siendo salud humana. Esto se aprecia en la Figura 21.

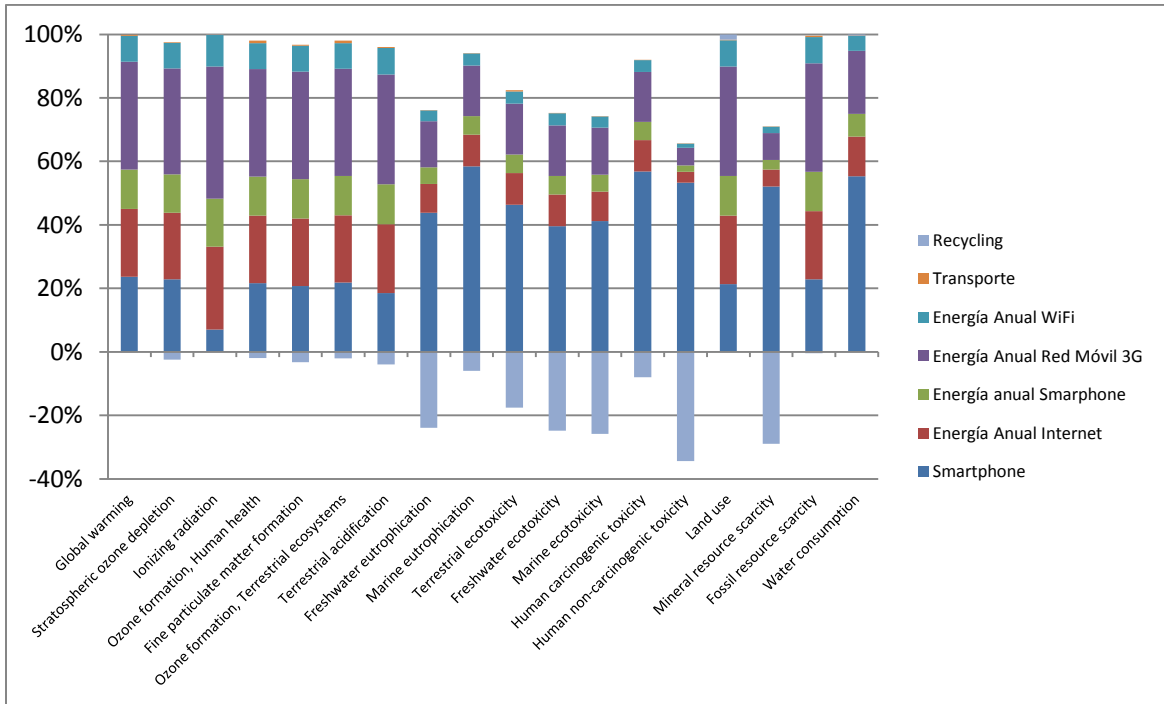


Figura 20. Impactos relativos de las categorías Midpoint del escenario B.



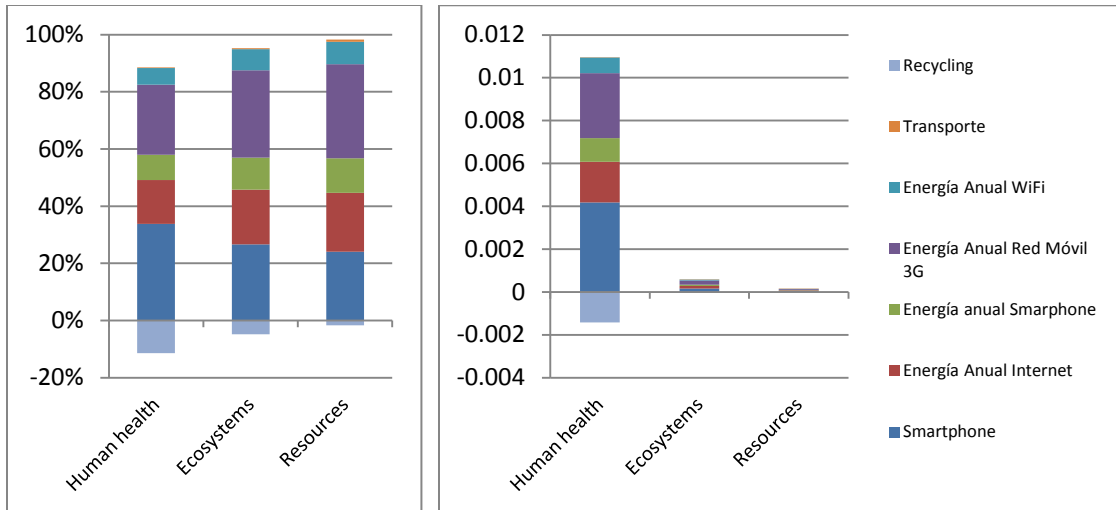


Figura 21. Impactos por categorías Endpoint del escenario B. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.

## 7.4 Escenario C

En el escenario C se considera que durante 5 años, un smartphone es reparado sucesivas veces y luego pasa a ser reciclado, al igual que lo son los repuestos consumidos durante el ciclo de vida. En la Figura 22 aparecen los resultados Midpoint del ciclo de vida, asociados a este ciclo de vida aparecen los impactos del consumo de los repuestos, que cada uno conforma un ciclo de vida en sí mismo y tiene unos impactos relativos a ese ciclo de vida adicional.

En valores relativos no se aprecian diferencias significativas en cuanto a las vistas en el escenario B, de hecho estos impactos relativos son más bajas debido a que, por ejemplo, los repuestos de baterías no se reciclan, como ocurría en el escenario B, siendo éste el repuesto con mayor tasa de sustitución. En valores absolutos sin embargo los resultados son diferentes, ya que el consumo de recursos de fábrica es menor en este escenario.

Al igual que en los escenarios anteriores, la categoría normalizada de mayor impacto es la salud humana. En este caso en la Figura 23 se pueden apreciar que el valor de los impactos absolutos para cada categoría es mucho menor que para los escenarios A y B. En el siguiente apartado se realizará una comparativa de los valores de cada escenario.

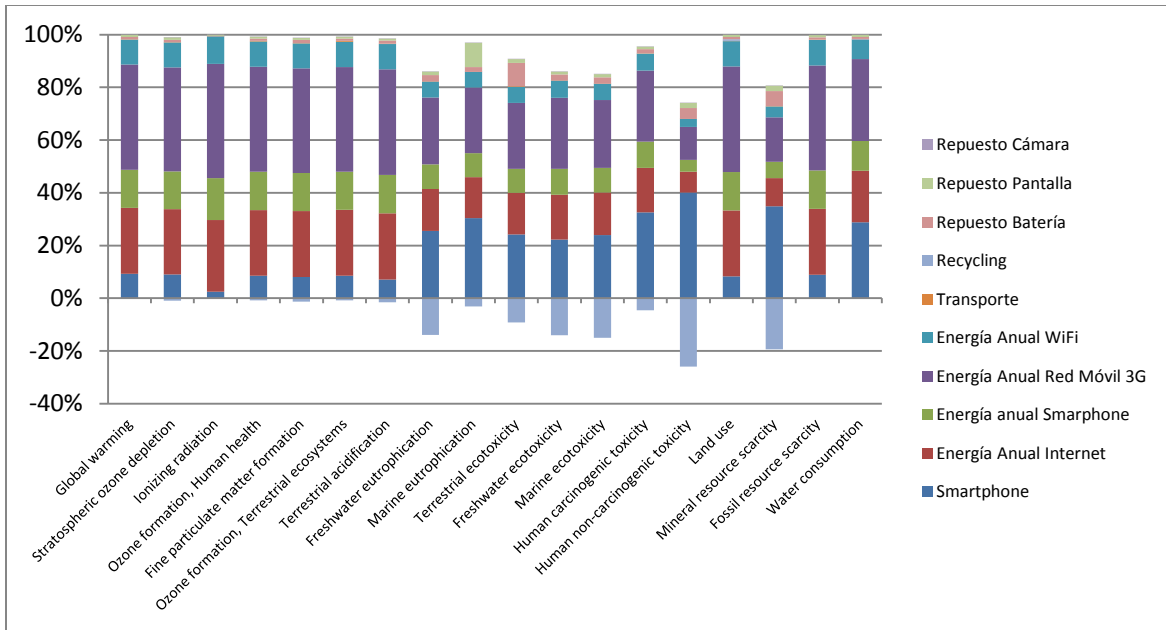


Figura 22. Impactos relativos de las categorías Midpoint del escenario C.

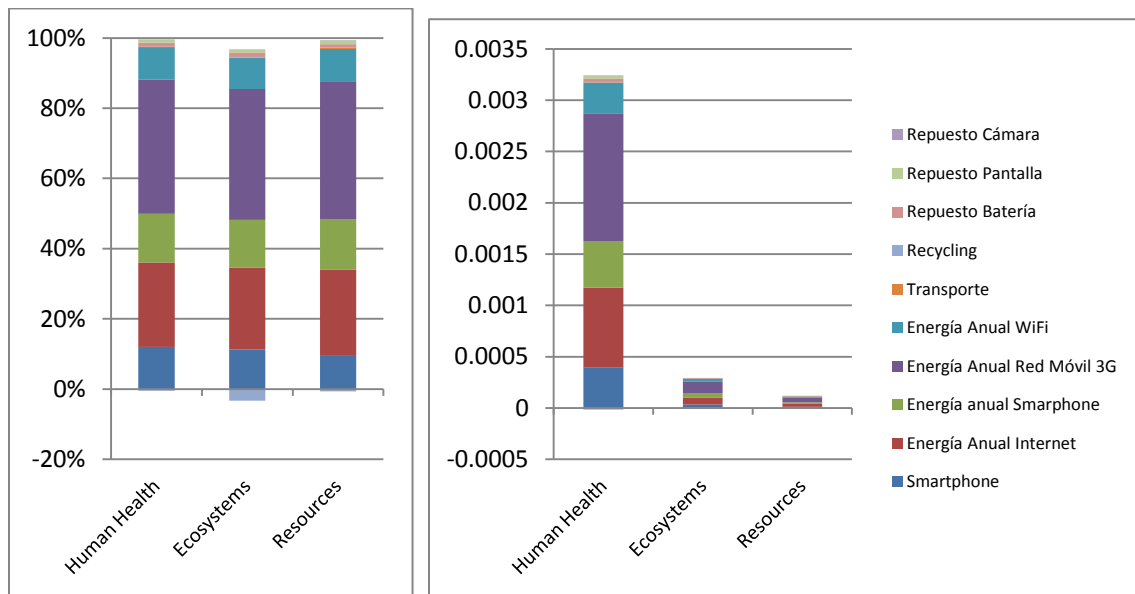


Figura 23. Impactos por categorías Endpoint del escenario C. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.

## 7.5 Comparación entre los escenarios A, B y C.

En los tres apartados anteriores se han visto los resultados del análisis de ciclo de vida en tres situaciones de uso del smartphone. Tomando como base el resultado del escenario A, se han

elaborado las siguientes figuras que muestran el porcentaje de impacto de cada escenario con respecto al escenario A. Como se puede observar en la Figura 24 la mitigación de impacto no es sustancial para varias de las categorías Midpoint, especialmente entre los escenarios A y B, no se aprecian diferencias para categorías en las que el reciclaje no aporta ningún beneficio, como radiación ionizante, consumo de agua, incluso la categoría uso del suelo es mayor para el escenario B que para el A. Las categorías en las que se aprecian mayores diferencias son en toxicidad humana, agotamiento de recursos minerales, ecotoxicidad y eutrofización.

Los resultados Endpoint arrojan resultados similares, pero las diferencias están más acentuadas que en los resultados Midpoint en general. En la Figura 25 se puede observar esta comparación, los resultados indican que la mayor diferenciación se produce en los resultados relativos a salud humana, luego en ecosistemas y por último en agotamiento de recursos.

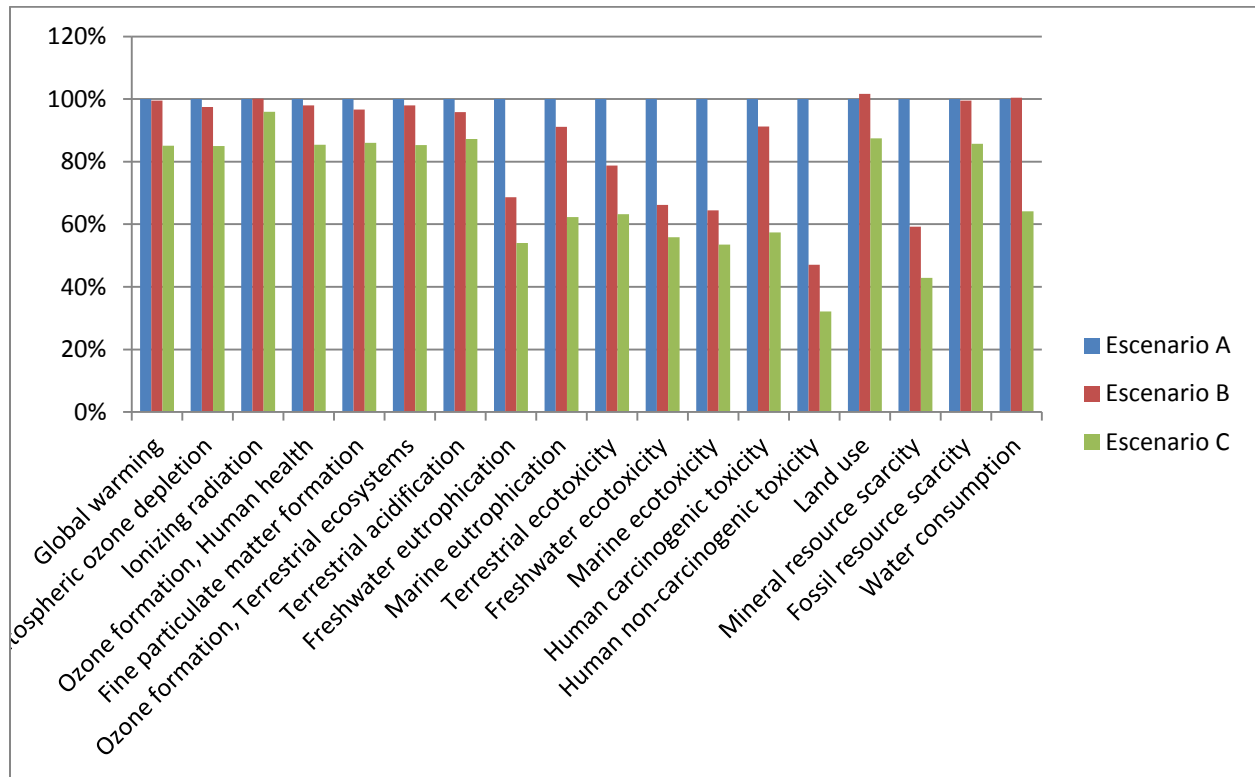


Figura 24. Relación entre los impactos de las categorías Midpoint tomando como base el escenario A.

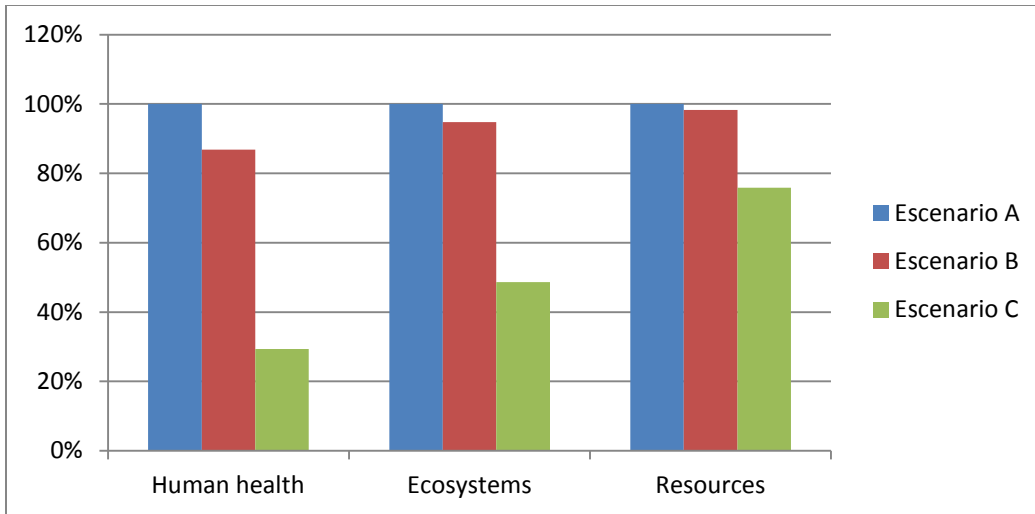


Figura 25. Relación entre las tres categorías Endpoint para los escenarios A, B y C, tomando como referencia el escenario A.

## 8 INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con este estudio, la metodología ACV demuestra ser una herramienta muy potente a la hora de evaluar los impactos de un producto tan complejo con un smartphone. De una manera cuantitativa se pueden asociar impactos a cada etapa del ciclo de vida de un smatphone y a cada uno de sus elementos de manera individual también. A la hora de cuantificar los impactos entre diferentes escenarios en los que se incluyen reparaciones y sustitución de repuestos resulta una metodología más objetiva que otras como los estudios coste-beneficio, por la diversidad de categorías de impacto que resultan del análisis. Sin embargo, hay otras consideraciones igualmente importantes que esta metodología no es capaz de resolver, especialmente las relacionadas con los aspectos sociales y económicos de cada escenario. Por ejemplo, no es posible evaluar los efectos positivos a nivel social relativos a que una empresa de fabricación de smartphones utilice materias primas consideradas libres de conflicto, o que las condiciones laborales para las diferentes actividades realizadas durante el ciclo de vida del producto sean mejores en un caso u otro. Por ejemplo, es posible que la labor de un servicio de reparación en Europa, que sustituye a la fabricación de todo un teléfono en China, se realice en mejores condiciones laborales. El análisis de ciclo de vida social (ACV Social o SLCA) es una herramienta que sí contabilizaría estos aspectos, algunas de las categorías que evalúa serían trabajo infantil, trabajos forzados, tiempo de trabajo excesivo, etc.

El ACV es una herramienta útil a la hora de cuantificar los impactos asociados a un producto, con diferencias grandes en impactos en cuanto a otros RAEE por unidad de masa, como recogen Canetta et al (2018) en su estudio, actualmente sólo se recojen datos relativos a la masa de los RAEE para cada país de la Unión Europea en Eurostat, sin embargo estos RAEE mostrarían mayor cantidad de impactos para dispositivos electrónicos que para electrodomésticos por unidad de masa, sería interesante evaluar métricas adicionales que ayuden a los usuarios a conocer la cantidad de impacto que poseen los productos que consumen como las consideradas en el ACV.

Los resultados obtenidos indican que las categorías con mayor impacto, para la mayoría de casos son las de la fabricación del teléfono y la de uso de la red móvil 3G. Se acentúa mucho el impacto sobre la salud humana, muy por encima de los impactos asociados a ecosistemas o agotamiento de recursos. Esto puede deberse a sustancias peligrosas encontradas en los smartphones como plomo, aunque se encuentre en desuso y los fabricantes se han dado prisa en buscar sustitutos, se ha encontrado en el inventario que muchos componentes incluían pequeñas cantidades de esta sustancia.

La utilización de escenarios permite la comparación entre tres situaciones para la evaluación cuantitativa de las ventajas que aporta cada una de ellas. De acuerdo con los resultados obtenidos, el impacto de la fabricación es mucho menor en el escenario C debido a una menor tasa de sustitución del smartphone, sin embargo esta mitigación de impacto queda invisibilizada en cierta medida por los impactos de la etapa de uso, especialmente de la red móvil y de internet,

que no se diferencian entre escenarios. Es habitual encontrar en la literatura que la etapa de uso reporta una mayor cantidad de impactos cuando se recoge la contribución de la red para móviles y smartphones (Suckling y Lee 2015; Ercan et al. 2016).

Algunos impactos recogidos en este estudio para la etapa de fabricación son bajos, pues así lo indican la mayoría de estudios relacionados. Por ejemplo los resultados de impacto en cambio climático, los 5,75 kg de CO<sub>2</sub> eq. de fabricación, son bajos en comparación con lo que es habitual, entre 20 y 60 kg de CO<sub>2</sub> eq. Si bien en otros estudios se consideran elementos adicionales como una funda para el teléfono, el cargador, o los auriculares, este valor sigue resultando bajo para la mayoría de estudios. En la Figura 26 se muestra un escenario comparativo con la literatura relacionada, donde se ve que el único estudio con una menor huella de carbono es Gündelik (2014), aunque ésta es prácticamente idéntica, y el siguiente es el Nokia Lumia 720 con una huella de carbono de 15 kg CO<sub>2</sub> eq. De haber obtenido un valor más alto en esta categoría de impacto asociada a la fabricación del smartphone, los resultados del escenarios C serían más positivos aún, en comparación con A.

Es interesante recalcar que el origen de la desviación puede estar en las bases de datos utilizadas para el inventario. Muchos estudios en los que se obtienen valores más elevados utilizan datos de GaBi (Proske, Clemm, y Richter 2016; Ercan et al. 2016), y otros estudios en los que se realiza el inventario mediante Ecoinvent dan valores similares a los obtenidos en este estudio para la categoría de impacto de cambio climático (Gündelik 2014; Cruz Sotelo et al. 2017).

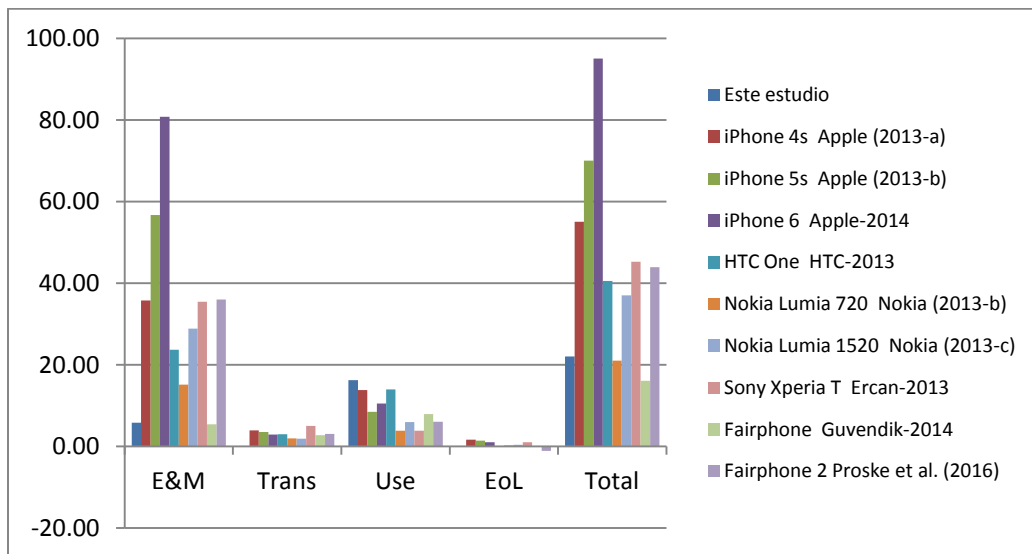


Figura 26. Comparativa del estudio con otros de su ámbito para la categoría de cambio global (kg de CO<sub>2</sub> eq.), con datos obtenidos de Suckling et al. (2015) y Proske et al. (2016)

Se aprecia que los impactos relativos al transporte son mucho menores en este estudio que en la mayoría de estudios de ACV de smartphones, esto se debe a que en la práctica el transporte de productos se realiza por aire, y no por mar. Las diferencias son sustanciales, de 0,08 kg de CO<sub>2</sub> eq. del impacto relativo a transporte por tierra y mar, se obtienen entre 2 y 4 kg de CO<sub>2</sub> eq. para los smartphones considerados en la Figura 26.

En cuanto al reciclaje, los resultados del escenario B en la categorías Midpoint no reportan grandes beneficios cuando se comparan con el escenario A. Se puede intuir que el reciclaje no tiene una mitigación de impacto significativa cuando los impactos atribuidos al uso son grandes. Además, el reciclaje tampoco supone una recuperación sustantiva de recursos como puede verse en la categoría Midpoint de escasez de recursos minerales y en la categoría Endpoint de recursos, para el escenario B.

Para analizar la fiabilidad de los datos asociados al reciclaje se ha investigado la cantidad de materias primas que se obtienen en el inventario del teléfono y se ha contrastado con la literatura. Las materias primas asociadas al inventario del smartphone cuadran con lo que se ve en la literatura para el cobre y el níquel. El oro da un valor algo superior a la mitad del valor esperado, y la plata y el paladio dan valores muy por debajo de lo esperado, en la Tabla 13 se observan los porcentajes de materias primas que contiene el smartphone recuperadas en el proceso de reciclado y se comparan con los estimados por Valero Navazo et al. (2014) y Yu et al. (2010).

	Masa (mg)	Porcentaje (%)	Resultados ACV	Valero Navazo et. al (2014)	Yu et al. (2010)	Singh et al. (2018)
COBRE	13600.44	%	12.477%	12.9	13	-
NÍQUEL	1635.02	%	1.500%	1.5	0.1	-
PLATA	28.35	ppm	260.13	3,666	1400	1732
ORO	14.61	ppm	134.06	354	350	190.9
PALADIO	0.0656	ppm	0.60	151	200	40.16
PLATINO	0.0641	ppm	0.59	5	-	-
RODIO	0.0037	ppm	0.03	-	-	-

Tabla 13. Contenido de metales recuperados en el reciclaje y contraste con los datos aportados por la literatura.

Es significativo que los consumos de la etapa de uso al asociar al smartphone la infraestructura de telecomunicaciones sean tan altos. Y el hecho de trasladar a las empresas de telefonía esos consumos que son producto del uso de la tecnología que hacen los usuarios es significativo, ya que los usuarios no serán capaces de reducir su impacto si no ponen de su parte los operadores de telefonía móvil. Se denota además que los datos en este sentido son antiguos y de baja calidad, ya que parten principalmente de Schaefer et al. (2003), un reciente artículo apunta a esta falta de datos, pero también a que los avances en eficiencia energética han podido suplir el aumento de datos consumidos por los usuarios en términos energéticos (Pihkola et al. 2018). Sin embargo, no se sabe si es una tendencia que se vaya a poder mantener en el futuro dada la velocidad a la que

avanzan las tecnologías de comunicación móvil. En unos pocos años hemos pasado del 1G al 5G que está ahora en pruebas en algunos países, avanzando a una tecnología por década y con un consecuente aumento del consumo de datos de internet y de energía en la infraestructura de telecomunicaciones. Es claro es que pese al menor peso que presentan fabricación y reciclaje dentro del ciclo de vida, y que ocultan las diferencias entre escenarios, no hay que dejar de impulsar el sector de las reparaciones, el mantenimiento y el reacondicionamiento de teléfonos durante su vida útil. El impulso de energías renovables en el sector energético reduciría significativamente los impactos de la etapa de uso, tanto la energía consumida por la infraestructura de comunicaciones como la del propio teléfono. Esto ya se viene haciendo desde 2009 cuando se fijaron por primera vez los objetivos de la UE en materia de gases de efecto invernadero y energías renovables. Los objetivos que se fijaron a partir del año base de 1990 fueron los de una reducción de los GEI en un 27%, un aumento de las renovables hasta el 27% del mix energético y una mejora de la eficiencia energética del 27%, estos valores se situaron en un 40% para la reducción de GEI, un 32% de cuota de renovables y un 32,5% de mejora de la eficiencia energética en la última revisión de objetivos en 2018. Ello resultaría en un mayor impacto relativo de la etapa de fabricación, y el impulso en paralelo del sector de reparación en el ámbito de la telefonía móvil reportaría grandes beneficios ambientales. La unión Europea ha comenzado a potenciar la reutilización desde 2008, puesto que las iniciativas anteriores sobre gestión de RAEE habían dado lugar a una preferencia significativa por el reciclaje.

Se debe poner aún mayor énfasis en la etapa de diseño del producto, de acuerdo con la directiva Directive 2009/125/EC, un 80% de los impactos ambientales son el resultado de decisiones tomadas en la etapa de diseño de producto. Pese al impulso que tuvieron alternativas modulares o de fácil reparación en el mercado de los smartphones como el Puzzlephone, Phoneblocks o el Fairphone, incluso algunos de las grandes marcas vieron la luz como el LG G5, sin embargo no es una tendencia que esté ganando un amplio sector del mercado, en parte debido a las complicaciones prácticas que suponían para el usuario. Deben centrarse esfuerzos en crear un marco regulatorio que introduzca medidas de ecodiseño para los smartphones, y los productos electrónicos en general, ya que parece que no se está abordando este concepto desde los smartphones que mayoritariamente llenan el mercado. Esto favorecería un auge en el sector de las reparaciones, que a su vez podrían contar con un marco legal favorable e incentivos para que sea la alternativa preferente. Algunas de éstas recomendaciones son el resultado de un trabajo realizado por Watson et al. (2017). La viabilidad de los negocios de reparación de smartphones depende de decisiones tomadas en la etapa de diseño del producto, y los representantes de estos negocios no tienen ninguna implicación en este tipo de decisiones por lo que tiene sentido proteger estos negocios, a la vista de los resultados de la Figura 25 para el escenario C. Además, deberían incluirse unas garantías exigibles de stock de repuestos a los fabricantes por cada unidad vendida, así como el mantenimiento de alternativas ante la obsolescencia a la que se abocan muchos smartphones. No siempre se trata de una obsolescencia programada, si no que



muchas veces los productos se abandonan, ante los requisitos de tiempo de dedicación de nuevos productos fabricados por las empresas.

Siempre debe recurrirse a la reutilización de acuerdo con la legislación europea, sin embargo no siempre es posible ya que la aparición de los sistemas integrados de gestión (SIG) han ido haciendo de la reutilización un sector poco habitual debido a la complejidad que el sistema integrado de reutilización de productos implicaría, es mucho más fácil pensar en un smartphone como un conjunto de valores porcentuales de metales que pueden recuperarse y vender, puesto que con esta visión se pueden agregar toneladas y toneladas de estos dispositivos, mientras que la gestión de la reutilización es mucho más compleja, cuando cada smartphone debe reacondicionarse para su reutilización, o desensamblarse para aprovechar sus partes.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con este estudio se han demostrado las posibilidades que puede aportar la metodología ACV para el estudio de escenarios de reparación, reutilización y reciclaje de smartphones. Cuanto más significativa sea la contribución de impactos durante la etapa de fabricación, más énfasis debe hacerse en la reutilización de los productos. Con la metodología ACV se permite conocer cuantitativamente el nivel de impactos para cada escenario y en cada etapa, lo que puede permitir al sector de las reparaciones aportar datos que respalden el impulso de políticas a favor de este sector.

Se deben realizar más estudios empíricos sobre los consumos reales de las infraestructuras de red móvil y a ser posible para las diferentes tecnologías, 3G, 4G y 5G. En cualquier caso y con los datos recabados, una mejora de la eficiencia de las infraestructuras de comunicaciones así como un mayor impulso a las renovables reducirían significativamente los impactos asociados al uso del móvil. En paralelo, en la medida en la que se avance a cumplir los objetivos de uso de energías renovables presentes deberá prestar mayor atención a las reutilizaciones, y hacer así más eficiente el ciclo de vida de los smartphones para poder contribuir a mitigar los impactos de su utilización. Un marco legal favorable, así como garantías de stock de repuestos y precios asequibles son puntos clave para el sector de las reparaciones de smartphones, que es un sector que debe ser protegido para que siga aportando beneficios ambientales.

Es positivo desde un punto de vista medioambiental realizar labores de reciclaje de smartphones, pero se debe siempre tratar de pasar por la reparación y la reutilización puesto que el reciclaje aporta ventajas limitadas, solo se recupera una parte de las materias primas que componen el teléfono, y los procesos de reciclaje también tienen un coste para el medio ambiente que hace que sus beneficios se reduzcan. Desde este punto de vista, facilitaría que los fabricantes por un lado diseñaran productos que facilitaran su reciclaje, especialmente en lo relacionado al desensamblado de la batería, y por otro establecieran directivas o recomendaciones para la reparación y la reutilización de los teléfonos que fabriquen.

Por último, es difícil obtener resultados fiables de un ACV realizado desde la perspectiva de un usuario que ha adquirido un smartphone y se ha propone analizarlo mediante desensamblado, ya que mucha información del fabricante facilitaría la fase de inventario del ACV. Exigir estudios de producto mediante ACV a los fabricantes de teléfonos puede ser una herramienta útil para que los consumidores tomen decisiones informadas sobre los smartphones, así como pautas para la escenificación de uso y reciclaje de smartphones en estos estudios y que se puedan contrastar entre sí.

Poner sobre la mesa escenarios realistas que pongan el foco en la mejor manera de reducir impactos y como dirigirse hacia allí es un reto que se deberá abordar en el futuro de este sector.

## 10 REFERENCIAS

- Baldé, C. P., V. Forti, V. Gray, R. Kuehr, y P. Stegmann. 2017. «The Global E-waste Monitor 2017».
- Boyd, Sarah B. 2012. *Life-Cycle Assessment of Semiconductors*. New York: Springer.
- Canetta, Luca, Alessandro Fontana, Michele Foletti, y Moise Tschanen. 2018. «Sustainability Assessment of Various Circular Economy Scenarios in the Consumer Electronics Sector». En *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1-9. Stuttgart: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436270>.
- Corcoran, Peter, y Anders Andrae. 2013. «Emerging Trends in Electricity Consumption for Consumer ICT». <http://hdl.handle.net/10379/3563>.
- Cruz Sotelo, Samantha Eugenia, María Dolores Bovea Edo, Sara Ojeda Benitez, y Néstor Santillán Soto. 2017. «EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL AL EXTENDER LA VIDA ÚTIL DEL TELÉFONO MÓVIL». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33 (4): 701-12. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.04.13>.
- Deloitte. 2016. «There is no place like phone». <http://www.deloitte.co.uk/mobileuk2016/assets/pdf/Deloitte-Mobile-Consumer-2016-There-is-no-place-like-phone.pdf>.
- . 2018. «Global Mobile Consumer Survey 2018, The Netherlands».
- Ditrendia. 2018. «Informe Ditrendia Mobile en España y en el Mundo 2017», 12.
- Ercan, Mine, Jens Malmödin, Pernilla Bergmark, Emma Kimfalk, y Ellinor Nilsson. 2016. «Life Cycle Assessment of a Smartphone». En *Proceedings of ICT for Sustainability 2016*. Amsterdam, the Netherlands: Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/ict4s-16.2016.15>.
- European Commission. 2014. «REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU».
- Frey, Sibylle D., David J. Harrison, y Eric H. Billett. 2008. «Ecological Footprint Analysis Applied to Mobile Phones». *Journal of Industrial Ecology* 10 (1-2): 199-216. <https://doi.org/10.1162/108819806775545330>.
- Gartner. 2018. «Gartner Says Worldwide Sales of Smartphones Recorded First Ever Decline During the Fourth Quarter of 2017», 22 de febrero de 2018. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-02-22-gartner-says-worldwide-sales-of-smartphones-recorded-first-ever-decline-during-the-fourth-quarter-of-2017>.
- Güvendik, Merve. 2014. «From Smartphone to Futurephone». <http://resolver.tudelft.nl/uuid:13c85c95-cf75-43d2-bb61-ee8cf0acf4ff>.
- Huijbregts, Mark A. J., Zoran J. N. Steinmann, Pieter M. F. Elshout, Gea Stam, Francesca Veronesi, Marisa Vieira, Michiel Zijp, Anne Hollander, y Rosalie van Zelm. 2017. «ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (2): 138-47. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- Kantar Worldpanel. 2018. «Kantar Worldpanel - An incredible decade for the smartphone».
- Khaliq, Abdul, Muhammad Rhamdhani, Geoffrey Brooks, y Syed Masood. 2014. «Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective». *Resources* 3 (1): 152-79. <https://doi.org/10.3390/resources3010152>.

- Mathieux, Fabrice, Fabrice Mathieux, Fulvio Ardente, Silvia Bobba, Philip Nuss, Gian Andrea Blengini, Patricia Alves Dias, et al. 2017. *Critical Raw Materials and the Circular Economy: Background Report*. [http://publications.europa.eu/publication/manifestation\\_identifier/PUB\\_KJNA28832ENN](http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA28832ENN)
- OCU. 2013. «Reciclaje de aparatos: tu dinero a la basura», octubre de 2013. <https://www.ocu.org/tecnologia/television/informe/reciclaje-de-aparatos-tu-dinero-a-la-basura552634>.
- Odeyingbo, A.O., I.C. Nnorom, y O.K. Deubzer. 2019. «Used and Waste Electronics Flows into Nigeria: Assessment of the Quantities, Types, Sources, and Functionality Status». *Science of The Total Environment* 666 (mayo): 103-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.102>.
- Pagliaro, Mario, y Francesco Meneguzzo. 2019. «Lithium Battery Reusing and Recycling: A Circular Economy Insight». *Heliyon* 5 (6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866>.
- Pihkola, Hanna, Mikko Hongisto, Olli Apilo, y Mika Lasanen. 2018. «Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking». *Sustainability* 10 (7). <https://doi.org/10.3390/su10072494>.
- Proske, Marina, Christian Clemm, y Nikolai Richter. 2016. «Life Cycle Assessment of the Fairphone 2». [https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2016/11/Fairphone\\_2\\_LCA\\_Final\\_20161122.pdf](https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2016/11/Fairphone_2_LCA_Final_20161122.pdf).
- Puckett, Jim, Chris Brandt, y Hayley Palmer. 2018. «Holes in the Circular Economy: WEEE Leakage from Europe». [http://wiki.ban.org/images/f/f4/Holes\\_in\\_the\\_Circular\\_Economy\\_-\\_WEEE\\_Leakage\\_from\\_Europe.pdf](http://wiki.ban.org/images/f/f4/Holes_in_the_Circular_Economy_-_WEEE_Leakage_from_Europe.pdf).
- Schaefer, Carsten, Christoph Weber, y Alfred Voss. 2003. «Energy Usage of Mobile Telephone Services in Germany». *Energy* 28 (5): 411-20. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00154-8).
- Singh, Narendra, Huabo Duan, Fengfu Yin, Qingbin Song, y Jinhui Li. 2018. «Characterizing the Materials Composition and Recovery Potential from Waste Mobile Phones: A Comparative Evaluation of Cellular and Smart Phones». *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 6 (10): 13016-24. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02516>.
- Singhal, Pranshu. 2005. «IPP Pilot Project», 87.
- Suckling, James, y Jacquetta Lee. 2015. «Redefining Scope: The True Environmental Impact of Smartphones?» *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (8): 1181-96. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0909-4>.
- Tan, Kevin Chin Ning. 2005. «Life Cycle Assessment of a Mobile Phone». <https://eprints.usq.edu.au/499/1/KevinChinNingTAN-2005.pdf>.
- Tan, Quanyin, Huabo Duan, Lili Liu, Jie Yang, y Jinhui Li. 2018. «Rethinking Residential Consumers' Behavior in Discarding Obsolete Mobile Phones in China». *Journal of Cleaner Production* 195 (septiembre): 1228-36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.244>.
- Türkeli, Serdar, Beijia Huang, Agata Stasik, y René Kemp. 2019. «Circular Economy as a Glocal Business Activity: Mobile Phone Repair in the Netherlands, Poland and China». *Energies* 12 (3): 498. <https://doi.org/10.3390/en12030498>.

- Valero Navazo, Juan Manuel, Gara Villalba Méndez, y Laura Talens Peiró. 2014. «Material Flow Analysis and Energy Requirements of Mobile Phone Material Recovery Processes». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (3): 567-79. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0653-6>.
- Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, Reuter, y Serna-Guerrero. 2019. «A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective». *Batteries* 5 (4): 68. <https://doi.org/10.3390/batteries5040068>.
- Watson, David, Anja Charlotte Gylling, Naoko Tojo, Harald Throne-Holst, Bjørn Bauer, y Leonidas Milios. 2017. «Circular Business Models in the Mobile Phone Industry», 1-90. <http://dx.doi.org/10.6027/TN2017-560>.
- Wieser, H., N. Tröger, y R. Hübner. 2015. «The Consumers' Desired and Expected Product Lifetimes». En . <https://www.plateconference.org/consumers-desired-expected-product-lifetimes/>.
- Yu, Jinglei, Eric Williams, y Meiting Ju. 2010. «Analysis of Material and Energy Consumption of Mobile Phones in China». *Energy Policy* 38 (8): 4135-41. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.041>.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Usuarios de Smartphone en España. Fuente Ditrendia (2018)	12
Figura 2. Periodo de sustitución de teléfonos móviles entre 2013 y 2015 por países, en meses. Fuente Kamtar WorldPanel ComTech (2017)	13
Figura 3 Descomposición de componentes del teléfonos móviles por peso, diferenciando entre teléfonos celulares y smartphones. A) componentes y B) materiales. Fuentes Singh et. al (2018) y Singhal (2005)	14
Figura 4. Composición de los metales más importantes encontrados en teléfonos móviles, en masa, precio y energía de extracción. Fuente: Yu et al. (2010)	14
Figura 5. Localización mundial de las principales reservas de materiales críticos. Fuente: Comisión Europea (2014).	15
Figura 6. Diagrama de sankey de los principales materiales críticos, así como su volumen de demanda, utilizados en la industria electrónica. Fuente: Mathieux et al. (2017)	16
Figura 7. Un día en la vida de un teléfono. Fuente: Deloitte (2016)	17
Figura 8. Comparativa de los consumos asociados a la fase de uso de un smartphones en kWh para los estudios de Ercan et al. (2016) y Suckling et al. (2015). En el caso de los internet y los servidores, Ercan et al. agregan este valor, se ha dividido el valor entre las dos categorías. Para los valores de Sucking et al. el valor de conversión utilizado es de 0,6 kg CO <sub>2</sub> eq./kWh.	19
Figura 9. Causas de reemplazo de los terminales móviles en China. Fuente: Tan et al. (2018)	20
Figura 10. Diagrama de procesos de la empresa Umicore para el reciclado de RAEE. Fuente: Khaliq et al. (2014)	23
Figura 11. Fases del análisis de ciclo de vida. Fuente: ISO 14040	26
Figura 12. Relación entre las áreas de protección y las categorías de impacto para ReCiPe 2016. Fuente: Huijbregts et al. (2017)	27
Figura 13. Ciclo de vida de producto y repuestos asociados al ciclo de vida.	30
Figura 14. Identificación de componentes de la placa de circuito impreso principal.	36
Figura 15. PCB inferior con los componentes identificados marcados en color, nótese que el motor vibrador fue desoldado para su medición por separado.	38
Figura 16. Impactos relativos por categorías Midpoint de la fabricación del smartphone.	45
Figura 17. Impactos por categorías Endpoint de la fabricación del smartphone. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.	46
Figura 18. Impactos relativos de las categorías Midpoint del escenario A.	47
Figura 19. Impactos por categorías Endpoint del escenario A. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.	47
Figura 20. Impactos relativos de las categorías Midpoint del escenario B.	48
Figura 21. Impactos por categorías Endpoint del escenario B. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.	49
Figura 22. Impactos relativos de las categorías Midpoint del escenario C.	50
Figura 23. Impactos por categorías Endpoint del escenario C. A la izquierda los impactos en valores relativos, a la derecha se han normalizado estos impactos para su comparación.	50
Figura 24. Relación entre los impactos de las categorías Midpoint tomando como base el escenario A.	51
Figura 25. Relación entre las tres categorías Endpoint para los escenarios A, B y C, tomando como referencia el escenario A.	52

*Figura 26. Comparativa del estudio con otros de su ámbito para la categoría de cambio global (kg de CO<sub>2</sub> eq.), con datos obtenidos de Suckling et al. (2015) y Proske et al. (2016)* \_\_\_\_\_54

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Composición de los diferentes módulos del smartphone analizado y su respectiva masa .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. Composición y fuente de datos de los botones de encendido y volumen del smartphone .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Composición y fuente de datos del cable plano multiconexión .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Composición de componentes y elementos de la cámara de fotos trasera del smartphone .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5. Composición del componente PCB principal, a partir de los componentes electrónicos de montaje superficial, el soldante y la PWB que lo componen.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 6. Leyenda de identificación de componentes de la PCB principal y la PCB inferior. ....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7. Composición del componente PCB inferior, a partir de los componentes electrónicos de montaje superficial, el soldante y la PWB que lo componen.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 8. Descomposición del micrófono-altavoz en sus componentes, masa correspondiente y datos de inventario.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 9. Composición del módulo asociado al sensor IR para la detección de proximidad y el LED indicador del smartphone. ....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Transportes asociados a los productos considerados en el ACV, desde la salida de la fábrica hasta el punto de venta.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. En esta tabla se muestran los consumos considerados en la etapa de uso del smartphone. En la tercera columna se considera el consumo total de cada fracción de consumo de energía.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 12. Tasa de sustitución de cada producto considerado en el ciclo de vida para un periodo de tiempo de 5 años. ....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 13. Contenido de metales recuperados en el reciclaje y contraste con los datos aportados por la literatura. ....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 14. Resultados Midpoint para la fabricación del smartphone .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 15. Resultados Endpoint sin normalizar para la fabricación del smartphone .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 16. Resultados Endpoint normalizados para la fabricación del smartphone.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 17. Resultados de las categorías Midpoint sin normalizar para el escenario A .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 18. Resultados de las categorías Endpoint sin normalizar para el escenario A .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 19. Resultados de las categorías Endpoint normalizadas para el escenario A.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 20. Resultados de las categorías Midpoint sin normalizar para el escenario B .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 21. Resultados de las categorías Endpoint sin normalizar para el escenario B .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 22. Resultados de las categorías Endpoint normalizadas para el escenario B.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 23. Resultados de las categorías Midpoint sin normalizar para el escenario C .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 24. Resultados de las categorías Endpoint sin normalizar para el escenario C.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 25. Resultados de las categorías Endpoint normalizadas para el escenario C.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 26. Inventario de materiales, agua y energía para un cable o circuito plano flexible .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 27. Conectores considerados para el inventario de las PCB del estudio y sus referencias de fábrica.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 28. Inventario de materiales, agua y energía de la fabricación de conectores para los diferentes circuitos considerados, relativos a la PCB principal, la PCB inferior, el cable plano multiconexión y el sensor IR y LED de indicación. ....</i>	<i>73</i>



## ANEXO I. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

En este apartado se va a mostrar los resultados de la evaluación de impacto ambiental para el smartphone analizado en el ACV, estos resultados son los vistos en el Capítulo 7.

### Fabricación

En este apartado se muestran los resultados Midpoint sin normalizar, y en Endpoint se muestra la evaluación del daño y los valores normalizados.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Altavoz superior	Batería	Cable coaxial	Camara Frontal	Camara Trasera	FPC	Micrófono + Altavoz	Pantalla móvil	PCB principal	PCB bottom	Sensor IR + LED	Soportes de plástico	Tornillos	Electricidad	Transporte
Global warming	kg CO2 eq	5.75E+00	1.90E-02	2.67E-01	1.48E-03	6.84E-03	2.40E-02	1.88E-01	6.34E-02	1.25E+00	3.57E+00	1.56E-01	4.58E-02	1.05E-01	7.65E-03	3.47E-02	6.02E-03
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	2.93E-06	8.40E-09	1.60E-07	6.88E-10	3.01E-09	1.05E-08	4.65E-08	2.80E-08	7.87E-07	1.70E-06	9.21E-08	1.22E-08	1.43E-08	2.40E-09	6.23E-08	1.96E-09
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	7.66E-01	1.14E-03	1.85E-02	1.27E-04	3.60E-04	1.26E-03	3.08E-03	3.79E-03	3.54E-01	2.61E-01	1.73E-02	8.25E-04	1.91E-03	3.18E-04	1.02E-01	1.23E-04
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	1.76E-02	4.00E-05	9.84E-04	4.25E-06	1.68E-05	5.87E-05	6.14E-04	1.33E-04	3.34E-03	1.15E-02	4.66E-04	1.47E-04	1.78E-04	2.00E-05	4.76E-05	3.65E-05
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.29E-02	3.90E-05	1.15E-03	5.17E-06	1.54E-05	5.40E-05	3.13E-04	1.30E-04	2.50E-03	8.00E-03	4.39E-04	7.76E-05	1.18E-04	2.52E-05	5.98E-05	8.97E-06
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1.80E-02	4.19E-05	1.01E-03	4.36E-06	1.79E-05	6.28E-05	6.16E-04	1.40E-04	3.46E-03	1.17E-02	4.76E-04	1.48E-04	1.89E-04	2.05E-05	4.83E-05	3.70E-05
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2.89E-02	7.75E-05	2.91E-03	1.13E-05	4.71E-05	1.65E-04	7.20E-04	2.58E-04	6.24E-03	1.66E-02	9.44E-04	1.84E-04	2.73E-04	3.07E-05	3.30E-04	2.20E-05
Freshwater eutrophication	kg P eq	1.16E-02	9.17E-06	7.20E-04	2.50E-06	6.69E-06	2.34E-05	1.26E-04	3.05E-05	1.48E-03	8.88E-03	2.28E-04	2.84E-05	1.62E-05	2.96E-06	3.96E-05	6.67E-07
Marine eutrophication	kg N eq	1.16E-03	7.27E-07	4.19E-05	1.39E-07	4.42E-07	1.55E-06	4.20E-06	2.42E-06	8.48E-04	2.41E-04	1.25E-05	1.19E-06	2.43E-06	5.09E-07	4.14E-06	4.91E-08
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	5.75E+01	8.09E-02	1.37E+01	4.53E-02	1.43E-01	5.00E-01	4.32E-01	2.70E-01	8.78E+00	2.82E+01	4.94E+00	1.05E-01	5.61E-02	1.21E-01	7.67E-02	5.12E-02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.84E+00	8.66E-04	1.25E-01	3.80E-04	9.38E-04	3.28E-03	1.92E-02	2.88E-03	2.13E-01	1.44E+00	3.06E-02	4.25E-03	9.40E-04	5.66E-04	2.55E-03	1.42E-04
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2.60E+00	1.23E-03	1.79E-01	5.46E-04	1.37E-03	4.80E-03	2.69E-02	4.10E-03	3.00E-01	2.03E+00	4.52E-02	6.03E-03	1.30E-03	8.00E-04	3.32E-03	2.21E-04
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.46E+00	7.54E-04	4.52E-02	3.23E-04	5.32E-04	1.86E-03	1.36E-02	2.51E-03	9.81E-02	1.25E+00	1.39E-02	2.46E-02	3.48E-03	2.40E-03	2.58E-03	1.89E-04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	6.27E+01	2.81E-02	4.30E+00	1.32E-02	3.30E-02	1.16E-01	6.38E-01	9.35E-02	7.01E+00	4.91E+01	1.06E+00	1.41E-01	2.29E-02	1.10E-02	4.11E-02	5.13E-03
Land use	m2a crop eq	1.47E-01	4.19E-04	8.67E-03	8.74E-05	1.07E-04	3.75E-04	2.82E-03	1.39E-03	3.92E-02	8.60E-02	3.82E-03	6.81E-04	1.25E-03	2.89E-04	1.51E-03	1.69E-04
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1.08E-01	1.41E-04	1.17E-02	4.25E-05	6.92E-05	2.42E-04	9.55E-04	4.68E-04	1.52E-02	7.55E-02	2.86E-03	2.86E-04	6.65E-05	6.39E-04	1.55E-04	1.78E-05

Fossil resource scarcity	kg oil eq	1.42E+00	6.81E-03	7.53E-02	3.93E-04	1.26E-03	4.43E-03	3.78E-02	2.27E-02	3.26E-01	8.47E-01	3.95E-02	9.32E-03	4.20E-02	1.71E-03	7.81E-03	2.05E-03
Water consumption	m3	2.19E-01	1.95E-04	2.94E-03	1.22E-05	4.88E-05	1.71E-04	2.26E-03	6.50E-04	1.73E-02	1.86E-01	1.47E-03	4.49E-03	1.18E-03	4.46E-05	3.06E-03	1.76E-05

Tabla 14. Resultados Midpoint para la fabricación del smartphone

Daño de categoría	Unidad	Total	Altavoz superior	Batería	Cable coaxial	Camara Frontal	Camara Trasera	FPC	Micrófono + Altavoz	Pantalla móvil	PCB principal	PCB bottom	Sensor IR + LED	Soportes de plástico	Tornillos	Electricidad	Transporte
Human health	DALY	3.31E-05	5.15E-08	2.11E-06	8.73E-09	2.54E-08	8.91E-08	5.68E-07	1.72E-07	4.68E-06	2.41E-05	7.13E-07	2.15E-07	1.91E-07	3.35E-08	8.98E-08	1.31E-08
Ecosystems	species.yr	3.85E-08	8.89E-11	2.35E-09	1.05E-11	3.99E-11	1.40E-10	9.19E-10	2.96E-10	7.02E-09	2.57E-08	9.82E-10	2.77E-10	4.15E-10	3.75E-11	2.25E-10	2.92E-11
Resources	USD2013	3.45E-01	2.22E-03	2.26E-02	1.00E-04	3.16E-04	1.11E-03	4.91E-03	7.38E-03	9.27E-02	1.85E-01	1.00E-02	1.35E-03	1.53E-02	5.27E-04	1.09E-03	8.68E-04

Tabla 15. Resultados Endpoint sin normalizar para la fabricación del smartphone

Daño de categoría	Total	Altavoz superior	Batería	Cable coaxial	Camara Frontal	Camara Trasera	FPC	Micrófono + Altavoz	Pantalla móvil	PCB principal	PCB bottom	Sensor IR + LED	Soportes de plástico	Tornillos	Electricidad	Transporte
Human health	1.39E-03	2.17E-06	8.87E-05	3.68E-07	1.07E-06	3.75E-06	2.39E-05	7.22E-06	1.97E-04	1.02E-03	3.00E-05	9.07E-06	8.05E-06	1.41E-06	3.78E-06	5.51E-07
Ecosystems	5.38E-05	1.24E-07	3.28E-06	1.47E-08	5.56E-08	1.95E-07	1.28E-06	4.13E-07	9.80E-06	3.59E-05	1.37E-06	3.86E-07	5.80E-07	5.23E-08	3.15E-07	4.07E-08
Resources	1.23E-05	7.91E-08	8.08E-07	3.58E-09	1.13E-08	3.95E-08	1.75E-07	2.64E-07	3.31E-06	6.59E-06	3.58E-07	4.83E-08	5.45E-07	1.88E-08	3.90E-08	3.10E-08

Tabla 16. Resultados Endpoint normalizados para la fabricación del smartphone

## Resultados para el escenario A

En este apartado se muestran los resultados absolutos de las categorías Midpoint para el escenario A, así como la evaluación del daño y los valores normalizados para este escenario.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Landfill	Transporte
Global warming	kg CO2 eq	7.30E+01	1.73E+01	1.55E+01	9.02E+00	2.47E+01	5.95E+00	2.40E-01	2.33E-01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3.75E-05	8.80E-06	8.05E-06	4.67E-06	1.28E-05	3.08E-06	8.62E-08	1.61E-08
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	3.25E+01	2.30E+00	8.48E+00	4.92E+00	1.35E+01	3.25E+00	6.01E-03	4.05E-04
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	2.39E-01	5.29E-02	5.19E-02	3.01E-02	8.27E-02	1.99E-02	1.84E-03	3.54E-05
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.81E-01	3.88E-02	3.98E-02	2.31E-02	6.34E-02	1.52E-02	5.81E-04	1.75E-05
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2.41E-01	5.39E-02	5.22E-02	3.03E-02	8.32E-02	2.00E-02	1.86E-03	3.60E-05
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4.49E-01	8.66E-02	1.02E-01	5.90E-02	1.62E-01	3.89E-02	1.61E-03	3.72E-05
Freshwater eutrophication	kg P eq	6.05E-02	3.48E-02	7.22E-03	4.19E-03	1.15E-02	2.77E-03	2.80E-05	5.23E-06

Marine eutrophication	kg N eq	5.76E-03	3.48E-03	5.97E-04	3.46E-04	9.51E-04	2.29E-04	2.02E-06	1.57E-04
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	3.07E+02	1.72E+02	3.74E+01	2.17E+01	5.96E+01	1.43E+01	1.67E+00	1.17E-02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.06E+01	5.52E+00	1.40E+00	8.12E-01	2.23E+00	5.36E-01	4.72E-03	1.32E-01
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.42E+01	7.81E+00	1.76E+00	1.02E+00	2.80E+00	6.74E-01	7.35E-03	1.73E-01
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	7.11E+00	4.39E+00	7.62E-01	4.42E-01	1.21E+00	2.92E-01	6.95E-03	4.76E-03
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2.34E+02	1.88E+02	1.22E+01	7.09E+00	1.95E+01	4.68E+00	1.67E-01	2.82E+00
Land use	m2a crop eq	2.03E+00	4.40E-01	4.46E-01	2.59E-01	7.11E-01	1.71E-01	5.55E-03	9.40E-04
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	4.43E-01	3.25E-01	3.31E-02	1.92E-02	5.28E-02	1.27E-02	6.16E-04	1.36E-05
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1.86E+01	4.27E+00	4.01E+00	2.33E+00	6.39E+00	1.54E+00	8.05E-02	2.55E-03
Water consumption	m3	1.19E+00	6.58E-01	1.48E-01	8.59E-02	2.36E-01	5.67E-02	7.02E-04	1.06E-04

Tabla 17. Resultados de las categorías Midpoint sin normalizar para el escenario A

Daño de categoría	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Landfill	Transporte
Human health	DALY	2.61E-04	9.93E-05	4.52E-05	2.62E-05	7.20E-05	1.73E-05	6.52E-07	8.87E-07
Ecosystems	species.yr	4.14E-07	1.16E-07	8.33E-08	4.84E-08	1.33E-07	3.19E-08	1.35E-09	7.87E-10
Resources	USD2013	4.23E+00	1.04E+00	8.89E-01	5.16E-01	1.42E+00	3.41E-01	3.38E-02	9.31E-04

Tabla 18. Resultados de las categorías Endpoint sin normalizar para el escenario A

Daño de categoría	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Landfill	Transporte
Human health	DALY	1.10E-02	4.18E-03	1.90E-03	1.10E-03	3.03E-03	7.29E-04	2.74E-05	3.73E-05
Ecosystems	species.yr	5.78E-04	1.61E-04	1.16E-04	6.76E-05	1.85E-04	4.46E-05	1.89E-06	1.10E-06
Resources	USD2013	1.51E-04	3.70E-05	3.17E-05	1.84E-05	5.06E-05	1.22E-05	1.21E-06	3.32E-08

Tabla 19. Resultados de las categorías Endpoint normalizadas para el escenario A

## Resultados para el escenario B

En este apartado se muestran los resultados absolutos de las categorías Midpoint para el escenario B, así como la evaluación del daño y los valores normalizados para este escenario.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Transporte	Recycling
Global warming	kg CO2 eq	7.26E+01	1.73E+01	1.55E+01	9.02E+00	2.47E+01	5.95E+00	2.40E-01	-1.05E-01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3.66E-05	8.80E-06	8.05E-06	4.67E-06	1.28E-05	3.08E-06	8.62E-08	-9.56E-07
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	3.25E+01	2.30E+00	8.48E+00	4.92E+00	1.35E+01	3.25E+00	6.01E-03	5.18E-02
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	2.34E-01	5.29E-02	5.19E-02	3.01E-02	8.27E-02	1.99E-02	1.84E-03	-4.88E-03
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.75E-01	3.88E-02	3.98E-02	2.31E-02	6.34E-02	1.52E-02	5.81E-04	-6.10E-03
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2.36E-01	5.39E-02	5.22E-02	3.03E-02	8.32E-02	2.00E-02	1.86E-03	-4.93E-03
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4.31E-01	8.66E-02	1.02E-01	5.90E-02	1.62E-01	3.89E-02	1.61E-03	-1.86E-02
Freshwater eutrophication	kg P eq	4.15E-02	3.48E-02	7.22E-03	4.19E-03	1.15E-02	2.77E-03	2.80E-05	-1.90E-02
Marine eutrophication	kg N eq	5.25E-03	3.48E-03	5.97E-04	3.46E-04	9.51E-04	2.29E-04	2.02E-06	-3.56E-04
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2.42E+02	1.72E+02	3.74E+01	2.17E+01	5.96E+01	1.43E+01	1.67E+00	-6.54E+01
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	7.03E+00	5.52E+00	1.40E+00	8.12E-01	2.23E+00	5.36E-01	4.72E-03	-3.47E+00
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	9.17E+00	7.81E+00	1.76E+00	1.02E+00	2.80E+00	6.74E-01	7.35E-03	-4.90E+00
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	6.49E+00	4.39E+00	7.62E-01	4.42E-01	1.21E+00	2.92E-01	6.95E-03	-6.16E-01
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.10E+02	1.88E+02	1.22E+01	7.09E+00	1.95E+01	4.68E+00	1.67E-01	-1.21E+02
Land use	m2a crop eq	2.07E+00	4.40E-01	4.46E-01	2.59E-01	7.11E-01	1.71E-01	5.55E-03	3.35E-02
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	2.63E-01	3.25E-01	3.31E-02	1.92E-02	5.28E-02	1.27E-02	6.16E-04	-1.81E-01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1.85E+01	4.27E+00	4.01E+00	2.33E+00	6.39E+00	1.54E+00	8.05E-02	-8.64E-02
Water consumption	m3	1.19E+00	6.58E-01	1.48E-01	8.59E-02	2.36E-01	5.67E-02	7.02E-04	4.51E-03

Tabla 20. Resultados de las categorías Midpoint sin normalizar para el escenario B

Daño de categoría	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Transporte	Recycling
Human health	DALY	2.27E-04	9.93E-05	4.52E-05	2.62E-05	7.20E-05	1.73E-05	6.52E-07	-3.36E-05
Ecosystems	species.yr	3.92E-07	1.16E-07	8.33E-08	4.84E-08	1.33E-07	3.19E-08	1.35E-09	-2.09E-08
Resources	USD2013	4.16E+00	1.04E+00	8.89E-01	5.16E-01	1.42E+00	3.41E-01	3.38E-02	-7.34E-02

Tabla 21. Resultados de las categorías Endpoint sin normalizar para el escenario B

Daño de categoría	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Transporte	Recycling
Human health	9.55E-03	4.18E-03	1.90E-03	1.10E-03	3.03E-03	7.29E-04	2.74E-05	-1.42E-03
Ecosystems	5.48E-04	1.61E-04	1.16E-04	6.76E-05	1.85E-04	4.46E-05	1.89E-06	-2.92E-05
Resources	1.48E-04	3.70E-05	3.17E-05	1.84E-05	5.06E-05	1.22E-05	1.21E-06	-2.62E-06

Tabla 22. Resultados de las categorías Endpoint normalizadas para el escenario B

## Resultados para el escenario C

En este apartado se muestran los resultados absolutos de las categorías Midpoint para el escenario C, así como la evaluación del daño y los valores normalizados para este escenario.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WIFI	Transporte	Recycling	Repuesto Batería	Repuesto Pantalla	Repuesto Cámara
Global warming	kg CO2 eq	6.20E+01	5.75E+00	1.55E+01	9.02E+00	2.47E+01	5.95E+00	8.00E-02	-3.49E-02	4.82E-01	5.30E-01	8.41E-03
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3.19E-05	2.93E-06	8.05E-06	4.67E-06	1.28E-05	3.08E-06	2.87E-08	-3.19E-07	2.89E-07	3.31E-07	3.75E-09
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	3.11E+01	7.66E-01	8.48E+00	4.92E+00	1.35E+01	3.25E+00	2.00E-03	1.73E-02	3.41E-02	1.48E-01	3.62E-04
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	2.05E-01	1.76E-02	5.19E-02	3.01E-02	8.27E-02	1.99E-02	6.13E-04	-1.63E-03	1.81E-03	1.45E-03	4.13E-05
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.56E-01	1.29E-02	3.98E-02	2.31E-02	6.34E-02	1.52E-02	1.94E-04	-2.03E-03	1.96E-03	1.06E-03	2.27E-05
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2.06E-01	1.80E-02	5.22E-02	3.03E-02	8.32E-02	2.00E-02	6.21E-04	-1.64E-03	1.85E-03	1.50E-03	4.25E-05
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	3.92E-01	2.89E-02	1.02E-01	5.90E-02	1.62E-01	3.89E-02	5.37E-04	-6.20E-03	4.89E-03	2.67E-03	6.80E-05
Freshwater eutrophication	kg P eq	3.27E-02	1.16E-02	7.22E-03	4.19E-03	1.15E-02	2.77E-03	9.32E-06	-6.33E-03	1.11E-03	6.18E-04	5.30E-06
Marine eutrophication	kg N eq	3.59E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.46E-04	9.51E-04	2.29E-04	6.74E-07	-1.19E-04	6.81E-05	3.53E-04	3.53E-07
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.94E+02	5.75E+01	3.74E+01	2.17E+01	5.96E+01	1.43E+01	5.57E-01	-2.18E+01	2.09E+01	3.70E+00	1.26E-01
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	5.94E+00	1.84E+00	1.40E+00	8.12E-01	2.23E+00	5.36E-01	1.57E-03	-1.16E+00	1.91E-01	8.89E-02	7.32E-04
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	7.63E+00	2.60E+00	1.76E+00	1.02E+00	2.80E+00	6.74E-01	2.45E-03	-1.63E+00	2.73E-01	1.25E-01	1.08E-03
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	4.08E+00	1.46E+00	7.62E-01	4.42E-01	1.21E+00	2.92E-01	2.32E-03	-2.05E-01	7.26E-02	4.10E-02	4.68E-04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	7.52E+01	6.27E+01	1.22E+01	7.09E+00	1.95E+01	4.68E+00	5.56E-02	-4.04E+01	6.53E+00	2.93E+00	2.57E-02
Land use	m2a crop eq	1.78E+00	1.47E-01	4.46E-01	2.59E-01	7.11E-01	1.71E-01	1.85E-03	1.12E-02	1.45E-02	1.65E-02	1.48E-04
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1.90E-01	1.08E-01	3.31E-02	1.92E-02	5.28E-02	1.27E-02	2.05E-04	-6.03E-02	1.77E-02	6.37E-03	5.70E-05
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1.60E+01	1.42E+00	4.01E+00	2.33E+00	6.39E+00	1.54E+00	2.68E-02	-2.88E-02	1.34E-01	1.38E-01	2.05E-03
Water consumption	m3	7.60E-01	2.19E-01	1.48E-01	8.59E-02	2.36E-01	5.67E-02	2.34E-04	1.50E-03	5.25E-03	7.24E-03	4.55E-05

Tabla 23. Resultados de las categorías Midpoint sin normalizar para el escenario C

Daño de categoría	Unidad	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WIFI	Transporte	Recycling	Repuesto Batería	Repuesto Pantalla	Repuesto Cámara
Human health	DALY	3.59E-05	4.35E-06	8.69E-06	5.05E-06	1.39E-05	3.33E-06	3.12E-08	-1.66E-07	4.31E-07	3.08E-07	4.14E-09
Ecosystems	species.yr	1.88E-07	2.26E-08	4.71E-08	2.74E-08	7.51E-08	1.81E-08	2.65E-10	-6.62E-09	2.68E-09	1.72E-09	3.05E-11
Resources	USD2013	3.56E+00	3.40E-01	8.86E-01	5.15E-01	1.41E+00	3.40E-01	1.12E-02	-2.27E-02	3.85E-02	3.92E-02	6.95E-04

Tabla 24. Resultados de las categorías Endpoint sin normalizar para el escenario C

Daño de categoría	Total	Smartphone	Energía Anual Internet	Energía anual Smartphone	Energía Anual Red Móvil 3G	Energía Anual WiFi	Transporte	Recycling	Repuesto Batería	Repuesto Pantalla	Repuesto Cámara
Human health	3.23E-03	3.91E-04	7.81E-04	4.54E-04	1.25E-03	3.00E-04	2.81E-06	-1.49E-05	3.87E-05	2.77E-05	3.72E-07
Ecosystems	2.81E-04	3.38E-05	7.03E-05	4.08E-05	1.12E-04	2.70E-05	3.95E-07	-9.88E-06	4.00E-06	2.57E-06	4.56E-08
Resources	1.15E-04	1.10E-05	2.85E-05	1.66E-05	4.55E-05	1.09E-05	3.62E-07	-7.31E-07	1.24E-06	1.26E-06	2.24E-08

Tabla 25. Resultados de las categorías Endpoint normalizadas para el escenario C.

## ANEXO II. INVENTARIO DE CIRCUITO FLEXIBLE

Los datos de este componente se han obtenido de los cables planos estándares flexibles de la empresa molex, que tiene disponibles su listado de materiales. Los datos de consumo de agua y energía, así como residuos se han realizado en base a los informes de RSC de 2013 y 2014, y se han asignado los recursos económicamente. La información del componente es la referencia 150150223

([https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0150150223\\_CABLE.xml](https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0150150223_CABLE.xml)).

<b>Energies (J)</b>	Fuel	71635.45
	Electricity	661803.21
<b>Water</b>	Consumption (L)	0.969
<b>Emissions</b>	g CO2 eq.	5.726
<b>Waste</b>	Water (L)	0.462
	NH Non-Recycle	1.865
	NH Recycle	6.496
	Hazardous	1.124
<b>Materials</b>	Oxirane, 2,2'- [[[(oxiranylmethoxy)phenyl]methylene]bis[[[(1,1-dimethylethyl)methylphenylene]oxymethylene]]bis- (9CI)	5.34E-04
	Silicon dioxide	2.09E-04
	Titanium-dioxide	3.62E-04
	2-(2-Butoxyethoxy)ethyl dihydrogen phosphate, compound with N,N-dime...	8.30E-05
	Aromatic hydrocarbons	1.11E-04
	2-(2-Ethoxyethoxy)ethyl acetate 1H,3H-Benzo(1,2-c:4,5-c')difuran-1,3,5,7-tetrone, polymer with 4,4'-...	9.70E-05
	3.61E-01	3.61E-01
	Epoxy resin	1.48E-01
	Copper	4.79E-01
	Nickel	1.05E-02
	Gold	3.46E-04
<b>TOTAL</b>	<b>1.00E+00</b>	

Tabla 26. Inventario de materiales, agua y energía para un cable o circuito plano flexible



## ANEXO III. INVENTARIO DE CONECTORES

La información de los componentes que se han inventariado para los conectores se ha obtenido del fabricante molex. En la siguiente tabla se muestran las identificaciones correspondientes al PCB principal.

NAME	UD.	Unit weight (mg)	MAN.	REFERENCE	ENLACE
SIM CARD CONNECTOR	2	317	MOLEX	78727-0001	<a href="https://docs.rs-online.com/be0d/0900766b81198dfa.pdf">https://docs.rs-online.com/be0d/0900766b81198dfa.pdf</a>
SD CONNECTOR	1	316	MOLEX	47571-0001	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0475710001_MEMORY_CARD_SOCKET.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0475710001_MEMORY_CARD_SOCKET.xml</a>
BATTERY CONNECTOR	1	65.2	MOLEX	105040-0001	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/1050400001_PCB_HEADERS.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/1050400001_PCB_HEADERS.xml</a>
USB	1	321	MOLEX	47491-0001	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0474910001_IO_CONNECTORS.xml&amp;channel=Products&amp;Lang=en-US">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0474910001_IO_CONNECTORS.xml&amp;channel=Products&amp;Lang=en-US</a>
RF	2	16	MOLEX	73412-0110	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0734120110_RF_COAX_CONNECTORS.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0734120110_RF_COAX_CONNECTORS.xml</a>
FCP 6	1	27.581	MOLEX	503480-0600	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5034800600_FFC_FPC_CONNECTORS.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5034800600_FFC_FPC_CONNECTORS.xml</a>
FPC 10p	1	39.191	MOLEX	503480-1000	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5034801000_FFC_FPC_CONNECTORS.xml&amp;channel=Products&amp;Lang=en-US">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5034801000_FFC_FPC_CONNECTORS.xml&amp;channel=Products&amp;Lang=en-US</a>
FPC 25p	3	38.526	MOLEX	502078-2510	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5020782510_FFC_FPC_CONNECTORS.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5020782510_FFC_FPC_CONNECTORS.xml</a>
V-FPC 10p	1	15.685	MOLEX	504618-1012	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5046181012_PCB_RECEPTACLES.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5046181012_PCB_RECEPTACLES.xml</a>
V-FPC 24P	1	22.577	MOLEX	504618-2412	<a href="https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5046182412_PCB_RECEPTACLES.xml">https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/5046182412_PCB_RECEPTACLES.xml</a>

Tabla 27. Conectores considerados para el inventario de las PCB del estudio y sus referencias de fábrica.

En la siguiente tabla se muestra la información de inventario asociada a los conectores de cada módulo, según el listado de materiales de los componentes identificados y sus respectivas masas.

		MAIN PCB	BOTTOM PCB	FPC	IR Sensor
<b>Energies (J)</b>	Fuel	387200.6431	32699.32993	43033.37018	8693.939042
	Electricity	3577148.142	302092.3374	397563.2348	80318.84358
<b>Water</b>	Consumption	5.239052868	0.442441203	0.582266857	0.117634118
<b>Emissions</b>	g CO2 eq.	30.94968571	2.613719792	3.439739333	0.694923125
<b>Waste</b>	Water (L)	2.497627828	0.21092619	0.277585652	0.056080031
	NH Non-Recycle (kg)	10.07801637	0.851094615	1.120067894	0.226284903
	NH Recicle (kg)	35.11152634	2.965189765	3.902285126	0.788370255
	Hazardous (kg)	6.073142067	0.512880543	0.674967295	0.136362188
<b>Materials</b>	LCP	2.291E-01	0.000E+00	4.930E-03	0.000E+00
	BASIC POLYMER: LCP	2.618E-02	5.770E-03	0.000E+00	1.438E-03
	BASIC POLYMER: PA46	5.475E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	PA46	6.831E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	GF-Fibre	8.159E-02	1.178E-03	1.080E-03	3.150E-04



FMACP	4.000E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Talc	4.495E-02	0.000E+00	1.080E-03	3.150E-04
Carbon black	1.771E-03	0.000E+00	1.080E-04	3.200E-05
Mineral powder MAGNESIUM POWDER (STABILIZED)	5.856E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Sodium benzothiazol-2-yl sulfide	7.807E-03	1.073E-03	0.000E+00	0.000E+00
Petrolatum	1.400E-06	1.000E-06	2.400E-06	3.000E-07
Lauramide 1,1-Dioxide-1,2- benzothiazol-3(2H)-one, sodium salt	1.600E-05	1.200E-05	2.400E-05	3.000E-06
Octadecylamine	5.000E-06	5.000E-06	0.000E+00	0.000E+00
Copper	2.500E-07	2.000E-07	2.800E-07	4.000E-08
Iron	3.449E-01	1.839E-02	5.348E-03	1.336E-03
Titanium	5.413E-01	5.000E-06	0.000E+00	0.000E+00
Nickel	4.348E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Zinc (metal)	9.895E-02	1.420E-04	5.600E-05	2.700E-05
Tin	1.388E-03	1.388E-03	0.000E+00	0.000E+00
Cobalt	2.951E-02	1.310E-03	4.640E-04	1.160E-04
Gold	6.298E-06	2.200E-07	2.800E-07	4.200E-08
Palladium	2.051E-03	3.700E-05	5.600E-05	7.700E-06
Lead	3.000E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Chromium	1.800E-06	1.800E-06	0.000E+00	0.000E+00
Phosphorus	1.330E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Sulphur	5.160E-04	3.300E-05	1.200E-05	2.000E-06
Manganese	7.000E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2-Propenoic acid, 2- ethylhexyl ester, polymer with ethenyl acetate and N- (hydroxymethyl)-2- propenamide	2.190E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Further Additives	1.707E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
<b>TOTAL</b>	<b>5.724E-03</b>	<b>1.000E-09</b>	<b>1.000E-06</b>	<b>3.020E-07</b>
	<b>1.591E+00</b>	<b>2.936E-02</b>	<b>1.319E-02</b>	<b>3.595E-03</b>

Tabla 28. Inventario de materiales, agua y energía de la fabricación de conectores para los diferentes circuitos considerados, relativos a la PCB principal, la PCB inferior, el cable plano multiconexión y el sensor IR y LED de indicación.