

LA HUELLA DEL CARBONO DURANTE EL CICLO DE VIDA DEL TELÉFONO CELULAR

Samantha E. CRUZ-SOTELO¹, Sara OJEDA-BENITEZ², Quetzalli AGUILAR-VIRGEN³,
Paul A. TABOADA-GONZÁLEZ³, Néstor SANTILLÁN-SOTO², Onofre R. GARCÍA-
CUETO², Omar AGUILAR-VILLAVICENCIO¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México
samantha.cruz@uabc.edu.mx

² Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México
sara.ojeda.benitez@uabc.edu.mx

³ Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California,
México qaguilar@uabc.edu.mx

Resumen

El mercado de telefonía móvil ha experimentado un continuo crecimiento en la última década. Cada vez más, los teléfonos celulares son reemplazados por nuevos modelos con diseños más modernos y/o ampliación de funciones. Este estilo de vida provoca incremento en la cantidad de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que no siempre reciben tratamiento. Otro de los factores negativos asociados a los aparatos electrónicos es el alto consumo de energía, que además de ser necesaria para recargar la batería, también se requiere para realizar las llamadas, enviar mensajes de texto y transmitir datos a través de las redes de servicios inalámbricos. Redes que también transmiten una serie de señales de tráfico para direccionar correctamente las llamadas de los usuarios. El consumo total de electricidad aumenta las emisiones de los gases de efecto invernadero. Por ello en este trabajo se presentan los resultados de aplicar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al manejo del teléfono celular. Tomando como unidad funcional el ciclo de vida del teléfono celular promedio durante 30 meses, se modelaron tres escenarios considerando cuatro etapas: adquisición de materias primas/producción, distribución, uso y fin de vida útil/reciclaje. Se utilizó la base de datos Ecoinvent para configurar el inventario, las emisiones consideradas se asignaron en seis categorías de impacto según el método CML. Los resultados muestran beneficio ambiental al conservar por más tiempo en uso el teléfono celular, no sólo porque reduce impactos ambientales debido a la reducción de contaminación debido al manejo de los equipos en desuso, sino también porque ahorra recursos limitados y la energía necesaria para su extracción a través de la recuperación de los materiales que se encuentran en ellos.

Palabras claves: telefonía móvil, escenarios, impacto ambiental, Análisis de ciclo de vida

Abstract

The mobile phone's services market has experiencing a continuous growth in the last decade. Increasingly, mobile phones are replaced by new models having a more modern design and/or a larger number of functions. This lifestyle is causing an increase in the amount of waste electrical and electronic equipment generated, which not always have an appropriate treatment. Another negative factors associated with electronic devices is the high energy consumption, in addition to being necessary to recharge the battery, is also required to make calls, send text messages and transmitting data over wireless networks . Networks also broadcast a series of signs to properly direct calls from users. The total electricity consumption increases emissions of greenhouse gases. Therefore in this work the results of applying the methodology of Life Cycle Analysis (LCA) to mobile phone use are presented. The life cycle assessment methodology is applied to analyze the environmental benefit obtained by the extension of the lifespan of a mobile phone due to its reuse during different periods of time. Taking as a functional unit the life cycle of an average mobile phone during 30 months, three scenarios have been modeled considering four lifecycle stages: raw materials acquisition/production, distribution, use and end-of-life stage. Ecoinvent database has been applied to configure the life cycle inventory, and the emissions in the stage considered inventory allocated into six categories according to the method of impact CML. The results show environmental benefit to keep longer in use the mobile phone, not only because it reduces environmental impacts due to the reduction of contamination due to handling old equipment, but also because it saves limited resources and energy needed for extraction through the recovery of materials which are found in them.

Key words: mobile phones, scenarios, environmental impact, Life cycle assessment

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE's) constituyen una de las fracciones de residuos de más rápido crecimiento. Esta tendencia representa problemas ambientales y aumenta la necesidad de implementar acciones para su gestión (Tartiu, 2009; Mohabuth y Miles 2005), en la búsqueda de la minimización de impactos y de medidas para la valorización y aprovechamiento de los recursos (Sinha, 2005; Ylä-Mella, 2004).

Los teléfonos celulares son el producto electrónico más utilizado en el mundo. La rápida introducción de nuevas tecnologías, mejora y aumento en funcionalidades (cámaras y reproductores de música, etc.) provoca que estos dispositivos tengan ciclos de vida relativamente cortos, convirtiéndose rápidamente en tecnología obsoleta y son sustituidos a pesar de ser aun funcionales (Kasper *et al.*, 2011; Nnorom *et al.*, 2009; Osibanjo y Nnorom, 2008).

El uso del teléfono celular ha crecido de manera exponencial pasando de 4.7 billones de usuarios alrededor del mundo en el 2009 a 7 billones de suscriptores en 2014 (ITU 2014). En la actualidad, la telefonía móvil se ha convertido en un servicio indispensable, y ha experimentado un enorme y constante aumento desde la implementación del sistema GSM en los años 90. Por tanto, la producción ambientalmente segura, funcionamiento y tratamiento de la tecnología de telefonía móvil al final de su vida útil, es muy importante en un mundo ante el creciente número de redes de telefonía y los aparatos con componentes cada vez más complejos.

La gestión de los RAEE's supone un reto para la sociedad desde diferentes perspectivas: la ambiental, económica y social. Es necesario detectar las oportunidades de mejora, ya sea

en el diseño del Aparato Eléctrico-Electrónico (AEE) o en los procesos asociados a él, identificando las etapas y potenciales impactos que éstos ocasionan al finalizar su vida útil. El aumento en la producción de AEE's y el corto tiempo de vida útil de los dispositivos electrónicos de consumo, crea grandes volúmenes de equipos electrónicos en desuso u obsoletos (Osibanjo y Nnorom, 2007; Bigum, Brogaard, y Christensen, 2012; Song, Wang y Li, 2012). Los impactos potenciales sobre el ambiente están desde la etapa de obtención de materias primas y energía, así como en el proceso de transformación de los materiales, hasta la etapa de uso y disposición final. Los impactos se manifiestan en el uso del suelo, provocan calentamiento global, disminución de la capa de ozono, impactos ecotoxicológicos y toxicológicos sobre los seres humanos, acidificación, eutrofización, oxidación fotoquímica, etc. Estos daños se pueden reducir si durante la fabricación se incluyen estrategias de diseño para balancear aspectos de calidad y cantidad entre diferentes tipos de materiales usados. Además de prevenir al máximo los daños al medio ambiente, también es importante el tratamiento y eliminación adecuada de los residuos generados durante la producción (residuos líquidos, sólidos y emisiones a la atmósfera).

Existen diversas metodologías científicas que permiten apoyar la gestión medioambiental de los productos, procesos o servicios. Entre estas metodologías está el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ésta es una herramienta que ha sido aplicada para determinar los impactos ambientales y comparar sistemas de manejo, así como sus partes (Barton, Dalley, Patel 1996; Ekvall et al., 2007; Obersteiner et al., 2007; Schmidt and Pahl-Wostl, 2007; Winkler y Bilitewski, 2007). En otras investigaciones, se ha aplicado la metodología de ACV a otros aspectos del manejo de residuos sólidos municipales, tales como transporte, disposición, aprovechamiento (Cleary, 2009; Rajendra y Toolseeram, 2008; Rives et al., 2010). También se ha aplicado para evaluar el impacto que provoca la producción de un celular (Yamaguchi, et al, 2003), la toxicidad (Wu, 2008; Xu, et al., 2012), uso del celular (Constantiou y Kautz, 2008), modelos de difusión de la tecnología y la influencia en el desarrollo de la economía en un país (Aker, 2008) y patrones de crecimiento (Michalakelis et al., 2008).

De acuerdo a la norma ISO 14040-44 (2006), la evaluación del ciclo de vida comprende cuatro etapas:

- 1) Definición de objetivos y alcance del estudio; que identifica el propósito de ACV y determina límites y suposiciones basadas en el objetivo definido.
- 2) Análisis de inventario; en el cual se contabilizan los impactos medioambientales que el sistema en estudio ejerce sobre el medio.
- 3) Evaluación de impactos, es un proceso técnico, cuantitativo y/o cualitativo para caracterizar y evaluar los efectos de los contaminantes identificados en la etapa de inventario. Según la norma ISO 14044 (2006), este puede realizarse a dos niveles: considerando elementos obligatorios, que permiten obtener un indicador para cada categoría de impacto (etapas de clasificación, caracterización) y/o el considerando elementos opcionales, que permiten obtener un único indicador que engloba toda la información del inventario mediante la aplicación de un método de evaluación del impacto (etapas de clasificación, caracterización, normalización y ponderación).

Las categorías de impacto más utilizadas en la bibliografía, aplicando los factores de caracterización propuestos por el método CML (2000), son: kg Sb eq/Agotamiento abiótico, kg SO₂ eq/Acidificación, kg CO₂ eq/Calentamiento global (huella de carbono), kg CFC-11 eq/Destrucción de la capa de ozono, kg PO₄ eq/Eutrofización y kg C₂H₄ eq/Oxidación fotoquímica.

- 4) Interpretación de resultados; combina la información obtenida en la fase de inventario y evaluación del impacto para llegar a identificar las variables significativas. Los resultados

de esta interpretación pueden llevar a conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio.

Para el caso del teléfono celular, el ACV es una metodología que contribuye a la definición de estrategias en el contexto de la prevención de la contaminación. Su carácter sistemático permite interpretar el desempeño ambiental del teléfono celular en forma integral, tomando todos los impactos ambientales durante el ciclo de vida de este producto.

2. METODOLOGÍA

Para analizar el beneficio ambiental al extender la vida útil de un teléfono celular debido a su reutilización durante diferentes períodos de tiempo, se aplicó la metodología de ACV. Para ello, se tomó como escenario de referencia el uso de un teléfono celular promedio durante 18 meses (situación actual, S_0), la extensión de su vida hasta 24 (escenario 1, S_1) y 30 (escenario 2, S_2) meses. Tomando como unidad funcional (UF) el ciclo de vida de un teléfono celular promedio durante 30 meses, se modelaron tres escenarios de acuerdo con los siguientes supuestos:

Etapas 1: Adquisición de materias primas y producción. Con base a la caracterización del teléfono celular se obtuvo la composición media siguiente (peso promedio 91.97g): plástico 39.96%, ferrosos 2.41%, metales no ferrosos 5.04%, PCI (tablero de circuito impreso) 26.90% y batería 25.69%.

Etapas 2: Distribución. Suponiendo la producción del teléfono celular en China y su transporte a México, se han considerado los siguientes trayectos: 10771 kilómetros por barco transoceánico y 2888 kilómetros por carretera.

Etapas 3: Uso. Los tres escenarios fueron analizados considerando un consumo energético promedio de 9 kWh/año (Rosen & Meier, 2000) y utilizando la mezcla eléctrica mexicana correspondiente al año 2012. El escenario base (S_0) considera el reemplazo del teléfono celular a los 18 meses, el escenario 1 (S_1) asume su sustitución a los 24 meses, mientras que el escenario 2 (S_2) a los 30 meses.

Etapas 4: Fin de vida. Se asume el reciclaje de las fracciones de residuos generados siguiente: plástico 21.53%, ferroso 12.86% y no ferrosos 9.77%.

Se utilizó la base de datos Ecoinvent v2 (2008), para configurar el inventario de ciclo de vida, adaptando algunos datos al caso de estudio tal como es la aportación energética por tecnologías, el transporte y las distancias, el tratamiento de las fracciones separadas, etc.

El estudio de evaluación del ciclo de vida se realizó con base a las cuatro etapas de acuerdo a las indicaciones de la norma ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006).

Una vez definidos los escenarios a analizar se estableció la ponderación por etapa de análisis de acuerdo a la tabla 1.

Escenarios	Etapas de análisis			
	Adquisición/producción	Distribución	Uso	Fin de vida/Reciclaje
S0 (18 meses)	1.7	1.7	1	1.7
S1 (24meses)	1.3	1.3	1.1	1.3
S2 (30 meses)-UF	1	1	1.2	1

TABLA 1 PONDERACIÓN POR ETAPA DE ACV

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se presenta un resumen de los resultados del ACV por escenario para cada categoría de impacto.

Categoría de Impacto	Unidad	S ₂	S ₁	S ₀
Agotamiento Abiótico	Kg Sb eq	0.1734	0.1750	0.1769
Acidificación	Kg SO ₂ eq	0.2329	0.2426	0.2530
Calentamiento Global	Kg CO ₂ eq	22.3995	23.0907	23.8438
Destrucción de capa de ozono	Kg CFC-11 eq	8.13x10 ⁻⁶	1.08x10 ⁻⁵	1.35x10 ⁻⁵
Eutrofización	Kg PO ₄ ---eq	0.0076	0.0094	0.0113
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	0.0138	0.0151	0.0164

TABLA 2 CONTRIBUCIÓN AL IMPACTO AMBIENTAL POR ESCENARIO

En la figura 1 se observa el potencial de impacto ambiental para cada componente de un teléfono celular promedio.

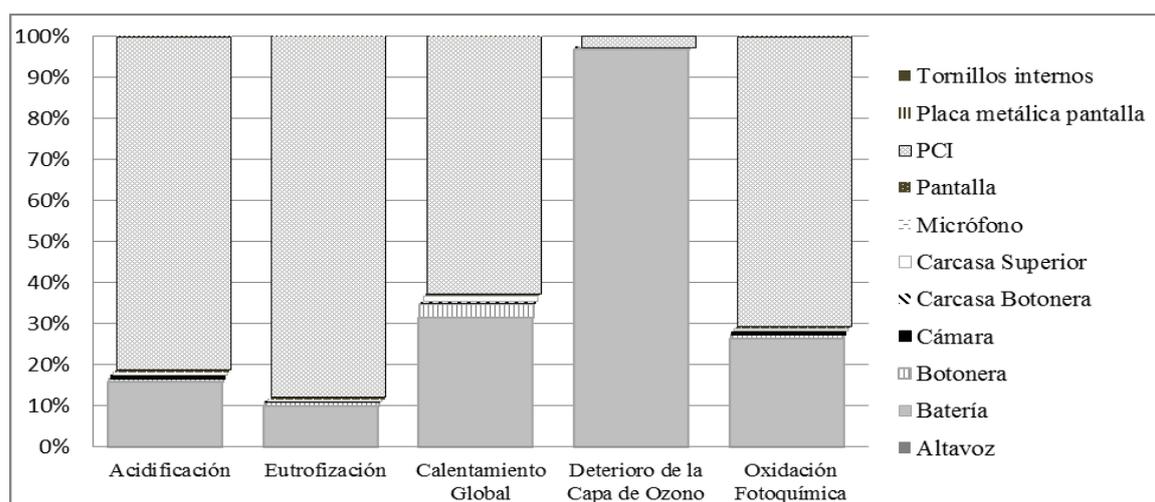


Figura 1 Contribución al impacto ambiental por componente

La figura 2 muestra el nivel de contribución al impacto ambiental por etapas de ciclo de vida del teléfono celular. Se observa que las etapas que representan mayor impacto son adquisición/producción y Uso. Además, el beneficio ambiental (carga evitada) debido a la recuperación de materiales secundarios.

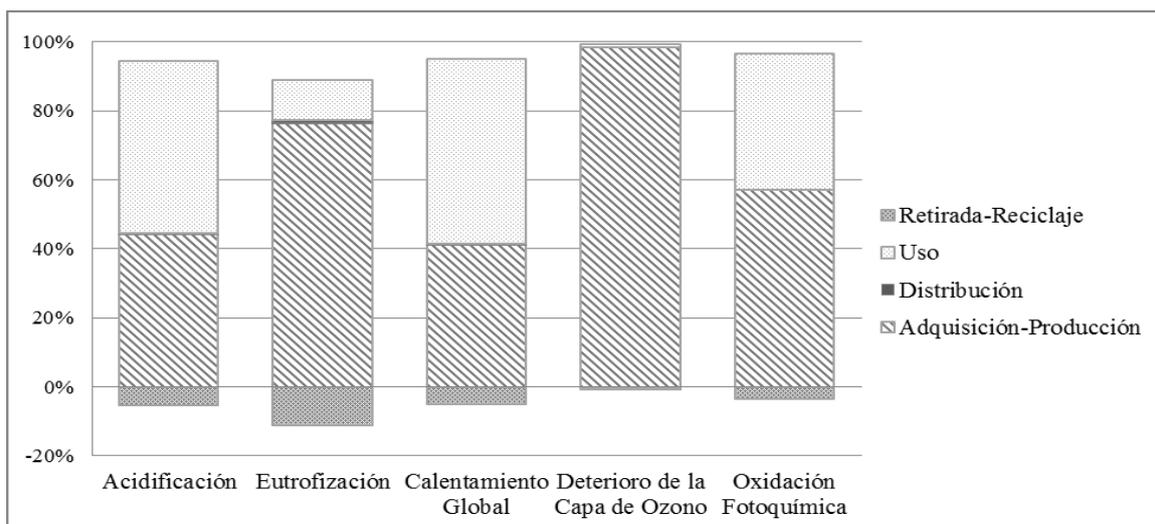


Figura 2 Contribución al impacto ambiental por etapa de ciclo de vida

La figura 3 (A-F) muestra una comparación del nivel de contribución al impacto ambiental por escenario. Se observa una significativa mejora ambiental para el escenario 1 y 2 con respecto al escenario base (s0).

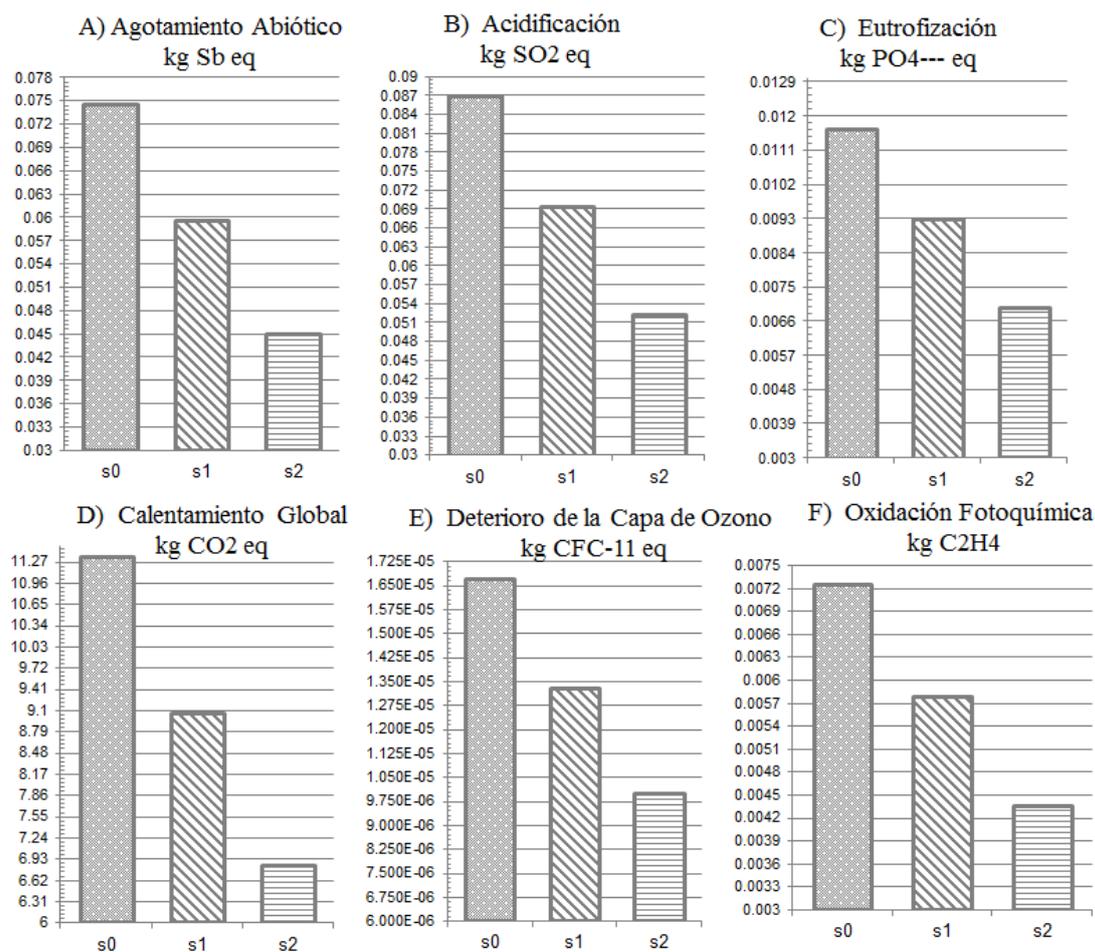


Figura 3 Comparativa de escenarios por categoría de impacto

El teléfono celular es una tecnología digital en constante expansión y evolución vinculada a aspectos económicos (cómo se utiliza), sociales y culturales (seguridad, privacidad, identidad, pertenencia, etc.). Ongondo (2011) menciona que la reutilización de estos dispositivos, así como su composición de materiales, en términos de masa y volumen, representan los productos electrónicos más valiosos que actualmente se encuentran en gran número en el flujo de residuos. Al final de su vida útil los teléfonos celulares son productos electrónicos de alto valor (a partir de una perspectiva de los recursos y la reutilización), alto volumen (cantidad) y de bajo costo (valor monetario residual).

El reciclaje de estos aparatos ahorra recursos y protege el medio ambiente porque además de prevenir la contaminación del subsuelo, evitamos extraer metales nuevos, eliminando excavaciones y deforestación.

El desarrollo sostenible hoy en día se convierte en un problema social obligatorio, especialmente para las empresas donde el gran reto es atender la demanda de una sociedad consumista cada vez más exigente.

Los estudios de ACV permiten identificar los potenciales impactos ambientales y además, en qué etapa del ciclo de vida del bien o producto es posible reducir o minimizar estos impactos.

En México, no se cuenta con información específica sobre el manejo y disposición de aparatos eléctricos y electrónicos al finalizar su vida útil, ya que la mayoría son dispuestos en el flujo de los residuos domiciliarios por lo que su gestión se realiza junto con los RSU's. Diversos factores en el ámbito social, económico y cultural que influyen en la generación y falta de manejo de aparatos eléctricos y electrónicos en desuso, como es la falta de recursos e infraestructura, la población no está consciente de los problemas asociados, ausencia o falta de claridad de bases legislativas, crecimiento industrial y los impactos de las nuevas tecnologías. Además en México, el fácil acceso para la adquisición de AEE's de segunda mano, hace necesario que el municipio garantice un sistema eficaz de control e imponga restricciones a la importación de aparatos, tal como la certificación de funcionalidad y tiempo de vida útil.

De acuerdo con los resultados obtenidos, es necesaria la implementación de medidas relativas a la gestión y manipulación de teléfonos celulares al final de su vida útil, teniendo en cuenta las oportunidades y beneficios que el aumento de vida útil, su reutilización representa. Además, teniendo en cuenta que son los equipos electrónicos de mayor consumo y que más se disponen en el flujo de los RSU's. Sin embargo, con el fin de formular estrategias, se es necesario tener en cuenta que la posibilidad de reciclar las fracciones recuperables depende de una serie de factores tales como la rentabilidad de los procesos de reciclaje, la existencia de mercados para el material reciclado, volumen, concentración y pureza del material reciclado, la existencia de tecnologías de separación y reciclado e infraestructura.

En la gestión de los RAEE's, el reciclaje juega un papel clave, no sólo porque reduce impactos ambientales debido a la reducción de contaminación debido a los tratamientos, sino también porque ahorra recursos limitados y la energía necesaria para su extracción a través de la recuperación de los materiales que se encuentran en ellos.

Sin embargo, antes de reciclar es importante considerar su reutilización (extensión de su vida útil), ya que una considerable cantidad de teléfonos celulares se desechan por razones de moda o estética, mientras que todavía funcional.

4. CONCLUSIONES

A través de este estudio se observa que la mayor contribución a los impactos ambientales se presenta en las etapas de adquisición/producción y uso de los teléfonos celulares. Además, los componentes que más impactan al ambiente son la batería y el circuito impreso (PCI). Por lo que, el ampliar los ciclos de vida útil de estos dispositivos representa una ganancia ambiental ya que no solo dejamos de contribuir a la generación de residuos, sino también ahorramos recursos al dejar de adquirir nuevos equipos.

5. REFERENCIAS

- Aker, B. J. C. (2008). Working Paper Number 154 October 2008 Does Digital Divide or Provide? The Impact of Cell Phones on Grain Markets in Niger, (154).
- Barton. R., Dalley, D., Patel, V.S., 1996. Life cycle assessment for waste management. *Waste Management* 16 (1-3), 35-50.
- Bigum, M., L. Brogaard, y T. H. Christensen (2012). Metal recovery from high-grade waste: A life cycle assessment, *Journal of hazardous materials*, 207-208, pp. 8-14.
- Cleary J. (2009). Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature *Environment International*, 35 (8) 1256-1266.
- Botelho, A., Pinto L. C. (2004). Diffusion of cellular phone in Portugal, *Telecommunications Policy* 28, 427-437.
- Ecoinvent Data v2. 2008. Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventory, 2008.
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., Finnveden, G. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management* (2007): 27 (8), 989-996.
- International Telecommunication Union (ITU). 2014. Estimated Key Global Telecom Indicators for the World Telecommunication Service Sector in 2014. En línea <http://graphitesoftware.com/wp/wp-content/uploads/2013/10/mobile-market-Q1-2014.pdf>
- Kasper A. C., Bernarders A. M. y Veit H. M. (2011). Characterization and recovery of polymers from mobile phone scrap *Waste Manag. Research* 29, 714.
- Michalakelis, C., Varoutas, D., & Sphicopoulos, T. (2008) Diffusion models of mobile telephony in Greece. *Telecommunications Policy*, 32, 234-245.
- Mohabuth N. y Miles N. (2005) The recovery of recyclable materials from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) by using vertical vibration separation”, *Resources, Conservation and Recycling* 45 pp. 60-69, 2005.
- Nnorom I.C., Ohakwe J. & Osibanjo O. Survey of willingness of residents to participate in electronic waste recycling in Nigeria –A case study of mobile phone recycling *Journal of*

cleaner Production 2009 17: 1629-1637

Obersteiner, G., Binner, E., Mostbauer, P., Salhofer, S. (2007) Landfill modelling in LCA – a contribution based on empirical data. *Waste Management* 27 (8), S58– S74.

Ongondo F.O., Williams I.D. (2011). Greening academia: Use and disposal of mobile phones among university students. *Waste Management* 31 (2011) 1617-1634.

Osibanjo O. e I. Nnorom, (2007), The challenge of electronic waste (e-waste) management in developing countries”, *Waste Management & Research*, 25, pp. 489-501.

Osibanjo O., Nnorom I. (2008). Material flows of mobile phones and accessories in Nigeria: Environmental implications and sound end-of-life management options *Environmental Impact Assessment Review* 28: 198-213

Rajendra K. F. y Toolseeram R. (2008) Life Cycle Assessment (LCA) of PET bottles and comparative LCA of three disposal options in Mauritius. *Int. J. Environment and Waste Management*. 2:125-130

Rives J., Rieradevall J., & Gabarrel X. (2010) LCA comparison of container systems in municipal solid waste management *Waste Management*, 30: (6) 949-957.

Schmidt, S. y Pahl-Wostl, C. (2007) Modelling biowaste flows for life-cycle assessment– calculation of the potential and collected weight of kitchen and garden waste. *Journal of Industrial Ecology*, 11: (1), 181–199.

Sinha K. D., Kraeuchi, P. Schwaninger M. (2005) A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India, *Environmental Impact Assessment Review*. 25, 492-504

Tartiu, V., E. (2009). The management of waste from electrical and electronic equipment (WEEE) in the European Union. Ph.D. The Ninth International Conference: Investments and Economic Recovery. The Bucharest Academy of Economic Studies, Romania, 2009. *Economia. Seria Management*, 12: (2), 218-222.

Van Biljon, J., Kotzé, P., Renaud, K., (2008). Mobile phone usage of Young adults: The impact of motivational factors. *OZCHI*, 287. In *Proceedings of the 20th Australasian Conference on Computer-Human Interaction: Designing for Habitus and Habitat*, pp. 57-64.

Winkler, J. y Bilitewski, B. (2007) Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management. *Waste Management*; 27: (8), 1021–1031.

Wu B. Y., Chan Y. C., Middendorf, A. Gu1 X. H. y Zhong W., (2008). Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: A case study of mobile phones in China. *Journal of Environmental Sciences* 20 (2008) 1403–1408.

Xu, X., Yang, H., Chen, A., Zhou, Y., Wu, K., Liu, J., Zhang, Y., et al. (2012). Birth outcomes related to informal e-waste recycling in Guiyu, China. *Reproductive toxicology* 33(1), 94–8.

Yamaguchi, H.; Tahara, K.; Itsubo, N.; Inaba, A.; (2003). A life cycle inventory analysis of cellular phones. In Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2003. EcoDesign'03. 2003 3rd International Symposium on: 445-451. IEEE.

Yla-Mella, E., Pongracz E., Keiski, R. L., (2004). Recovery of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in Finland. University of Oulu, Department of Process and Environmental Engineering. En línea: <http://www.oulu.fi/resopt/wasmin/ylamella.pdf>

8. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CONACYT, a través del programa de Fortalecimiento Académico del Doctorado de Alta Calidad Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería, UABC por el apoyo otorgado para la presentación de este trabajo.