

# Modelo para la predicción de la generación de residuos electrónicos

Berenice Citlalli Cárdenas Aragón<sup>1</sup>, Eduardo René Fernández González<sup>2</sup>, Jorge Rafael Figueroa Elenes<sup>3</sup>  
Facultad de Ciencias Económicas y Sociales<sup>1,3</sup>, Facultad de Ingeniería<sup>2</sup>  
Universidad Autónoma de Sinaloa  
Culiacán, Sin.;México  
berenice.cca81@gmail.com, [eddyf, fijr]@uas.edu.mx

**Abstract**— Nowadays it has accelerated the increase in the amounts of Waste Electrical and Electronic by society, generated in homes as a result of the consumption habits and obsolete electrical and electronic equipment. The goal that guides this paper is to propose a new methodology to estimate the quantities of such waste generated in households, by applying a new mathematical model; the methodology and the proposed prediction model was applied in the city of Culiacan Rosales, Sinaloa; however the application may be wispread to other settings. From the results it was found that the probability of unused cell phones is 48%, which is twice the probability if considers only the product life cycle.

**Keyword**— *prediction model WEEE, use and disposal of electronic, household electronic waste, mobile electronic equipment waste*

**Resumen**— En los últimos años se ha acelerado el incremento en las cantidades de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos generada en los hogares como consecuencia de los hábitos de consumo y desuso de los equipos eléctricos y electrónicos por parte de la sociedad. El objetivo que guía el presente trabajo es: proponer una nueva metodología para estimar las cantidades de dicho residuo generada en los hogares, mediante la aplicación de un nuevo modelo matemático; la metodología de trabajo y el modelo de predicción propuesto fue aplicado en la ciudad de Culiacán de Rosales, Sinaloa; sin embargo la aplicación puede ser generalizable a otros escenarios. De los resultados obtenidos se encontró que la probabilidad de desuso de los teléfonos celulares es del 48% lo que representa el doble de la probabilidad si sólo se considera al ciclo de vida del producto.

**Palabras claves**— *modelo de predicción de RAEE, uso y desecho de electrónicos, residuos electrónicos domésticos, residuos electrónicos de equipos móviles.*

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los fenómenos que ha llamado la atención desde distintas áreas del conocimiento es el incremento de las cantidades de residuos electrónicos generados en los hogares. Una de las formas de comprender el comportamiento social de los hábitos de consumo de equipos electrónicos y manejo de desechos electrónicos es mediante la modelización matemática.

Para el desarrollo del presente trabajo, se diseñó un modelo de predicción que fue aplicado para estimar las cantidades de residuos de diecinueve equipos electrónicos que van desde línea blanca hasta equipos móviles. Además, se estimaron las cantidades de plomo que se generaron por el desuso de cuatro tipos de equipos electrónicos. Los resultados de esta investigación pueden, por una parte, ser de utilidad para el diseño de políticas públicas que mitiguen el daño ambiental y de salud causada por los residuos electrónicos; por otra parte permite la valorización de recursos que al reintegrarse al proceso productivo generan un impacto económico positivo.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En los últimos veinte años, la problemática del desuso de los equipos eléctricos y electrónicos ha tenido un impacto social, ambiental y económico, que ha propiciado que académicos de todo el mundo estén trabajando en proyectos para encontrar soluciones de índole técnico, económico, político, social, comercial y medioambiental, por los desafíos que esta problemática representa a nivel mundial y local.

Los estudios han abordado el tema de los RAEE desde diversas áreas, entre ellas, los sistemas de manejo de residuos eléctricos y electrónicos (Queiruga et.al. 2012), diagnósticos de residuos electrónicos (Román, 2007a; Steubing et. al., 2010) reciclaje (Kim et. al. 2004, Hischier et. al. 2005), legislación (Chung y Zhang, 2011) políticas públicas, ciclo de vida del productos, análisis multicriterio (Rousis et. al. 2008; Queiruga et. al. 2008), y desde la óptica de la responsabilidad extendida del productor (McKerlie et. al., 2006; Khetriwal et. al.,2009).

De la literatura revisada, se encontraron estudios realizados a partir del año 2003 (Huisman, 2003); desde esa fecha hasta el año 2008 los estudios fueron relativamente escasos, incluyendo los de (Kang y Schoenung, 2005, 2006; Huang y Deng, 2006; Lee et. al., 2007; Nixon et. al., 2007; Kahhat et. al., 2008; Matkowski y Friedel, 2008), los cuales permiten contextualizar la problemática de los electrónicos para el presente trabajo, en un primer momento. Entre los años 2009 y 2010 se percibe el auge de esta temática (ej. Chancerel y Rotter, 2009a, 2009b; Gomes Salema et. al., 2009; Kautto, 2009; Khetriwal et. al., 2009; Maria et. al., 2009; Othman et. al., 2009; Robinson, 2009; Silva, 2009; Zoeteman, 2009; Brown et. al., 2010, Gamberini et. al., 2010, Lepawsky, 2010; Machado, 2010; Quariguasi, 2010; Shinkuma y Managi, 2010; Taurino et. al.,2010; Yang et. al., 2010; Yu et. al., 2010), con estos trabajos se obtuvieron los elementos para la realización del cuestionario aplicado para la propuesta del modelo de predicción y los modelos econométricos. En los años más recientes las publicaciones acerca de las investigaciones referentes a los RAEE han probablemente decrecido. Entre otros, se deben mencionar los trabajos (Bereketli et. al., 2011; Chung y Zhang, 2011; Ongondo et. al., 2011; Kahhat y Williams, 2012; Koh et. al., 2012; Mallawarachchi y Karunasena, 2012; Saphores et. al., 2012; Ni et.al., 2013; Shan et. al., 2014). Todo esto indica quizás que la difusión de las investigaciones sobre los residuos electrónicos se encuentra en estado embrionario, lo que en buena medida puede atribuirse a que la problemática se comenzó a percibir a principios de este milenio. Sin embargo, en las últimas investigaciones se observa un enfoque más social.

En México, el primer estudio que intenta explicar la situación de la problemática de los RAEE es la tesis titulada “Integrated Electronic Waste Management in Mexico: Law, Technology and Public Policy” (González, 2003), la cual aborda aspectos legales, tecnológicos y de política pública referentes al tema de los electrónicos. Sin embargo, el referente para las investigaciones relacionadas a la predicción de la generación de residuos electrónicos se halla en los diagnósticos elaborados por el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto Politécnico Nacional. Son estos, el “Diagnóstico sobre la generación de basura electrónica en México” (Román, 2007a), “Diagnóstico sobre la generación de residuos electrónicos al final de su vida útil en la región noreste de México” (Acevedo,2008), “Diagnóstico de la generación de residuos electrónicos en la frontera norte de México 2009”(Román, 2010) y “Diagnóstico de la generación de residuos electrónicos en la zona metropolitana del Valle de México” (Meraz, 2010).

Además de los estudios referentes a la predicción, en México se han realizado otros que permiten tener un referente más amplio de la problemática de los residuos electrónicos en el país y en su contexto internacional INE (2011). El manejo integral de los residuos ha sido analizado por Román (2007b), y la evaluación y el desarrollo de un sistema de manejo de la etapa final de vida de los residuos post-consumo de equipo de cómputo en México por Gavilán et. al. (2011, 2013). Asimismo, la tendencia de los estudios sobre residuos electrónicos es ir más allá de las cuestiones de estimación de cantidades o la consideración de aspectos legales y técnicos, por ello, se han planteado propuestas y alternativas para una gestión sostenible (González Ávila, 2012). Los estudios de Cruz et. al. (2010, 2013) se dirigen hacia los hábitos de consumo y la construcción de perfiles sociodemográficos en el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, tomando como escenario la ciudad de Mexicali, además de hacer estudios comparativos de los alumnos de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) campus Mexicali y de la Universitat Jaume I (UJI) en España.

Por otra parte, los modelos de predicción estudiados han sido un referente importante para estimar cantidades de residuos electrónicos. Con la finalidad de estimar la generación de RAEE y contar con una aproximación de las cantidades de aparatos eléctricos y electrónicos que se están desechando, se han desarrollado diversos métodos que se han aplicado en distintas regiones del mundo; para este estudio hemos identificado seis métodos. En el trabajo de Widmer et. al. (2005) se exponen el método del consumo y uso, método de suministro del mercado, método de la Agencia Ambiental Suiza y el método de Carnegie Mellon. En el diagnóstico nacional de basura electrónica, realizado en México (Román, 2007a) se desarrolló el método de balance de materiales, y en Brasil se aplicó el método del “paso del tiempo” (Araújo et al, 2012).

Los modelos que se muestran en la tabla I, se basan principalmente en las siguientes premisas:

1. Algunos equipos duran un tiempo mayor, otros menor, pero como media el desecho del equipo está determinado por la magnitud del tiempo de vida dado por el fabricante.
2. En un mercado saturado existe un equilibrio entre ventas y desechos; se postula la igualdad entre ellos.

La primera premisa olvida que las políticas de mercadotecnia, la evolución tecnológica y la moda asociada con la tecnología de punta, hacen que el desecho pueda ocurrir mucho antes que lo que predice el tiempo de vida. Por tanto, los niveles altos de deposición de sustancias nocivas pueden alcanzarse bastante antes de lo que predice cualquier modelo basado en la premisa 1. La inminencia del riesgo ambiental hace necesario un modelo que realice predicciones dinámicas en tiempos considerablemente más cortos que los que atañen al tiempo de vida.

La segunda premisa tiene más sentido en países con un generalizado alto nivel de vida, mantenido durante un tiempo suficiente para que se pueda considerar que el mercado está saturado. Esto no sucede en los países emergentes, ni tampoco en algunos países desarrollados con desequilibrios marcados.

El método de Carnegie Mellon presenta el inconveniente de que sólo se puede aplicar en los Estados Unidos de América, además de que se diseñó especialmente para estimar cantidades de computadoras de escritorio desechadas.

El estudio de Araújo et. al. (2012) presenta una alternativa diferente, y es el único que intenta una modelización dinámica; sin embargo su predicción se limita a un período reducido, y desdeña la importación de equipos que no está incluida dentro de las ventas registradas.

TABLA I. Modelos propuestos para estimar cantidades de residuos electrónicos.

Método	Características	Región	Ecuación básica	Fuente
Método del "consumo y uso"	Considera el equipamiento promedio de un hogar típico con aparatos eléctricos y electrónicos y como base para una predicción de la cantidad potencial de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Toma en cuenta el tiempo de vida de los productos.	Países bajos	$RAEE = \text{Num de AEE por hogar} / \text{tiempo de vida del aparato.}$	Silva (Ed), (2009) Widmer et. al (2005)
Método de "suministro del mercado"	Utiliza datos sobre cifras de producción y venta en una región geográfica dada. Toma en cuenta el tiempo de vida de los productos.	Alemania	$RAEE = \text{Producción} + \text{ventas}$	Silva (Ed), (2009) Widmer et. al (2005)
Método de la "Agencia Medioambiental Suiza"	Se basa en el supuesto de que los hogares privados ya están saturados, y que por cada aparato comprado, otro alcanza el fin de su vida útil. El tiempo de vida de los productos es irrelevante ya que toma en cuenta la saturación del mercado.	Suiza	$RAEE = \text{Productos en desuso} + \text{Productos nuevos}$	Silva (Ed), (2009) Widmer et. al (2005)
Método Carnegie Mellon	Se basa en cifras de venta; incluye parámetros de reutilización y almacenaje de máquinas obsoletas. Se utiliza para PC. El modelo no puede ser utilizado universalmente.	Estados Unidos de América	$\text{Residuos de PC} = \text{ventas} + (\text{reutilización} + \text{almacenaje de pc obsoletas})$	Silva (Ed), (2009) Widmer et. al (2005)
Método balance de materiales	Los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos potenciales serán iguales al número de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) producidos más los AEE importados legalmente menos los AEE exportados de una región.	México	$RAEE = \text{Producción} + \text{Importación} - \text{Exportación}$	Román, (2007a)
Método del "paso del tiempo"	Se utiliza para aparatos cuyo uso está relacionado con los avances tecnológicos como teléfonos celulares y equipos informáticos. Para éste modelo el ciclo de vida del producto es irrelevante ya que el tiempo está en función de las prácticas de mercado. Toma en cuenta las ventas de un año base restando los dispositivos en uso del año base menos los dispositivos del año anterior al año base.	Brasil	$RAEE_i = \text{ventas}_i - (\text{dispositivos en uso}_i - \text{dispositivos en uso}_{i-1})$	Aráujo, (2012)

### III. METODOLOGÍA

Consideremos un tipo de equipo electrónico cualquiera que denotaremos genéricamente con el subíndice i. Sea  $n_i(t_0, t_0+1)$  la cantidad del residuo electrónico producto i generada durante el año que comienza en  $t_0$ . Esa cantidad depende del número de usuarios que poseen el producto en el momento  $t_0$  y de la probabilidad de que un propietario lo deseche durante el año correspondiente.  $S_i N_i(t_0)$  representa la cantidad de equipo electrónico, en uso, del producto i en el instante  $t_0$  entonces  $n_i(t_0, t_0+1)$  se describe por la expresión. Tomando como ejemplo los datos de la tabla III para ejemplificar la expresión presentada encontramos que el producto (Refrigerador) para el año  $t_0$  (2013) se contaba con una cantidad

de 243,022 ( $N_i(t_0)$ ), la probabilidad de desecho de este equipo para el período  $(t_0, t_0+1)$  (2013,2014) fue de 0.2741 ( $p_i(t_0, t_0+1)$ ), multiplicando la cantidad en uso del producto  $i$  por la probabilidad de desecho se obtiene la cantidad de residuo electrónico para ese producto  $n_i(t_0)$  66612.

$$n_i(t_0, t_0+1) = N_i(t_0)p_i(t_0, t_0+1) \tag{1}$$

Donde:  $p_i(t_0, t_0+1)$  denota la probabilidad de que un usuario deseche el equipo electrónico durante el año que comenzó en  $t_0$ .

En el año que transcurre entre  $(t_0+k)$  y  $(t_0+k+1)$ , la cantidad de residuo electrónico (en número de objetos) generada del equipo electrónico  $i$  sería

$$n_i(t_0+k, t_0+k+1) = N_i(t_0+k)p_i(t_0+k, t_0+k+1) \tag{2}$$

Donde  $N_i(t_0+k)$  es la cantidad de poseedores en el momento  $t_0+k$  y  $p_i(t_0+k, t_0+k+1)$  es la probabilidad de que el usuario deseche su equipo electrónico durante el año que comienza en  $t_0+k$ .

Nos interesa modelar el comportamiento de  $N_i$  en función del tiempo para llegar a  $n_i$ . La cantidad de equipos electrónicos en manos de la población en un instante de tiempo específico depende de la existencia de equipos en el año anterior, de los desechos realizados, y de las adquisiciones durante el año corriente. En las adquisiciones se consideran naturalmente las compras realizadas dentro de la región más un componente de importación hacia ella que llamaremos  $imp(t)$ . Dado que no contamos con información precisa sobre esta función, consideraremos la siguiente suposición:

Supuesto 1: La cantidad de equipos electrónicos que se adquieren fuera de la región será considerada una función creciente proporcionalmente con las compras realizadas dentro de la entidad. Para el año que comienza en  $t_0$  este efecto se modela como:

$$imp(t_0, t_0+1) = factor\_de\_importación(t_0, t_0+1)ventas(t_0, t_0+1) \tag{3}$$

En esa expresión,  $ventas(t_0, t_0+1)$  denota el nivel de adquisiciones del objeto realizadas por las personas físicas dentro de la región en el año que comienza en  $t_0$ ; el  $factor\_de\_importación(t_0, t_0+1)$  refleja la constante de proporcionalidad, que puede depender de su argumento temporal.

La cantidad de equipos existentes se generaliza fácilmente al año  $t_0+k+1$

$$N_i(t_0+k+1) = N_i(t_0+k) + ventas(t_0+k, t_0+k+1) + factor\_importación \cdot ventas(t_0+k, t_0+k+1) - N_i(t_0+k)p_i(t_0+k, t_0+k+1) \tag{4}$$

Que a su vez sirve para calcular la generación de residuo electrónico del  $i$ ésimo equipo para el próximo año mediante la expresión

$$n_i(t_0+k+1, t_0+k+2) = N_i(t_0+k+1)p_i(t_0+k+1, t_0+k+2) \tag{5}$$

Comenzando en  $k=0$ , la aplicación recursiva de las fórmulas (2) y (4) (suponiendo conocidas las probabilidades de desecho del equipo, las ventas anuales, y asumiendo constante el factor de importación) permite obtener año tras año la cantidad de equipos desechados.

Una encuesta puede estimar  $N_i(t_0)$ ,  $p_i(t_0-1, t_0)$  a través de la frecuencia de desecho durante el año inmediatamente anterior al momento de la encuesta, y el factor de importación. Es razonable asumir que las probabilidades (aproximadas por la frecuencia) se mantienen constantes durante un período temporal relativamente corto alrededor de  $t_0$ ; la variabilidad de las mismas plausiblemente depende del tipo de equipo, siendo más estable en aquéllos menos sujetos a la moda y a la mercadotecnia. Asumiremos que  $p_i(t_0, t_0+1) \approx p_i(t_0-1, t_0)$ . Si este experimento se repitiera a lo largo de un período de 5-10 años, se podría

ajustar una función matemática que describa aceptablemente el cambio de esas probabilidades y del factor de importación.

Si se conoce la masa de las sustancias nocivas a la salud y al ambiente de cada equipo, pues multiplicando la variable  $n_i$  de (2) por su magnitud, se puede estimar el daño ambiental o el nivel de reciclaje o tratamiento que es necesario asegurar para evitar la degradación. Así, si  $\mu_{ij}$  es la masa de la sustancia  $j$  contenida en la unidad del producto  $i$ , la cantidad desechada de ella durante el año  $t_0+k$  será

$$\mu_{ij}(t_0+k, t_0+k+1) = \mu_{ij} n_i(t_0+k, t_0+k+1) = \mu_{ij} N_i(t_0+k)p_i(t_0+k, t_0+k+1) \quad (6)$$

Y mediante la suma

$$S_{ij}(K) = \sum_{k=0}^K M_{ij}(t_0+k, t_0+k+1) \quad (7)$$

es posible estimar la cantidad total desechada durante  $K$  años.

Si además  $R_j(K)$  denota la cantidad total reciclada de la sustancia  $j$  en  $K$  años, entonces la diferencia  $S_{ij}(K) - R_j(K)$  mide el deterioro ambiental en la  $j$ -ésima dimensión como consecuencia del desecho del producto  $i$ , y la sustentabilidad ambiental requiere que

$$\sum_i S_{ij}(K) - R_j(K) \leq 0 \quad (8)$$

a partir de cierto año  $t_0 + K$  y para toda sustancia  $j$ , donde la suma incluye todos los equipos que contienen la sustancia  $j$ .

Las políticas públicas tienen posibilidad de actuar sobre los dos términos de la expresión (8). Las regulaciones actúan sobre  $S_{ij}$ . La generalización de la responsabilidad extendida del productor influye sobre  $S_{ij}$  y  $R_j$ . Las campañas de concientización también influyen sobre ambas variables. Las medidas para estimular la recolección y el reciclaje actúan sobre  $R_j$ .

Para instanciar el modelo se diseñó una encuesta que se basa en el consumo y desuso de los equipos electrónicos.

#### IV. RESULTADOS

El modelo propuesto para estimar las cantidades de residuos de aparatos electrónicos en la expresión (1) fue instanciado mediante los datos obtenidos de una encuesta aplicada en la ciudad de Culiacán, Sinaloa en el año 2013, la cual se denominó Encuesta RAEE-CLN 2013.

En la tabla II se muestran los valores para calcular el total de equipos en uso y la probabilidad de desecho de los mismos. En las columnas 1, 2, 3, 5, 6 y 7 se presentan los resultados de la muestra. Los valores a nivel de Culiacán Rosales en la columna 4 se calculan mediante la relación población-muestra, esto es, el número de hogares, que fueron 218 mil 224, entre los 308 hogares de la muestra. Como resultado, obtenemos 708.52, el cual representa una constante que se utilizará para estimar el número de equipos de cada tipo que están en funcionamiento en la ciudad (columna 4). Las columnas 5-7 contienen la información muestral del residuo generado en el período septiembre 2013 - septiembre 2014. En la columna 8 se presenta la probabilidad de desecho del equipo durante un año natural para la muestra estudiada.

Los resultados mostrados en la tabla II indican que los teléfonos celulares tienen la probabilidad de desecho más alta (48 %) del grupo de equipos estudiados, mientras que las pantallas planas grandes (4.5%), los aires acondicionados minisplit (5%) y las tabletas electrónicas (8.4%) presentan la probabilidad más baja; plausiblemente esto puede atribuirse a su reciente inclusión en el mercado. Además, los resultados de las probabilidades de desecho de equipos de aire acondicionado de ventana (33%), aire acondicionado, minisplit (4.5%), televisores chicos (36%), televisores grandes (25%) y



pantallas planas chicas (15%) y pantalla plana grande (4.5%) vislumbran una transición tecnológica por equipos más nuevos y de mayor tamaño.

TABLA II. INSUMOS PARA INSTANCIAR MODELO DE PREDICCIÓN .

Aparato Eléctrico y Electrónico (subíndice i)	Cuántos tienen actualmente, que funcionen y utilicen (1)	Cuántos adquirieron en Culiacán de Rosales ventas (2)	Cuántos adquirieron fuera de Culiacán de Rosales (3)	Total de equipos estimado para la ciudad de Culiacán de Rosales, (2013-2014) (4)	Cuántos almacenó durante el año anterior (5)	Cuántos tiró a la basura durante el año anterior (6)	Cuántos llevó a un centro de acopio durante el año anterior (7)	Probabilidad de desecho del equipo en un año natural (8)
Refrigerador	343	336	6	243022.36	42	33	19	0.274052478
Lavadora	292	284	4	206887.84	28	27	11	0.226027397
Secadora de ropa	102	98	3	72269.04	6	2	3	0.107843137
Aire acondicionado minisplit	474	450	8	335838.48	15	6	3	0.050632911
Aire acondicionado de ventana	272	258	6	192717.44	44	27	21	0.338235294
Microondas	300	240	13	212556	20	23	5	0.16
Computadora de escritorio	209	191	15	148080.68	37	19	12	0.325358852
Impresora	167	157	12	118322.84	36	13	3	0.311377246
Teléfono fijo	284	268	9	201219.68	47	29	2	0.274647887
Pantalla plana chica (menos de 25")	166	152	7	117614.32	13	12	0	0.15060241
Pantalla plana grande (más de 32")	266	245	11	188466.32	7	3	2	0.045112782
Tv rayos catódicos chica (17")	93	84	9	65892.36	21	12	1	0.365591398
Tv rayos catódicos grande (más de 21")	155	143	4	109820.6	17	20	2	0.251612903
Equipo de video	251	231	20	177838.52	42	28	5	0.298804781
Consola de videojuego	169	127	33	119739.88	26	13	3	0.24852071
Cámara digital	238	201	34	168627.76	31	14	3	0.201680672
Teléfonos celulares	910	886	16	644753.2	231	177	31	0.482417582
Tabletas electrónicas	118	92	24	83605.36	4	2	4	0.084745763
Computadoras portátiles	311	277	31	220349.72	23	3	10	0.115755627
Otros:	155	131	7	109820.6	36	14	6	0.361290323

Los equipos de línea blanca, como refrigeradores y lavadoras, se desechan en cantidades muy importantes; como se observa en la tabla III, se desecharon 66 mil 612 refrigeradores y 46 mil 757 lavadoras en el período de septiembre de 2013 a septiembre de 2014. Del total de equipos estudiados, los teléfonos celulares son los que generan mayor número de residuos, con un total de 309 mil 482 equipos desechados, lo que representa más de un equipo por hogar.

TABLA III. PRONÓSTICO DE DESECHO DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS PARA CULIACÁN DE ROSALES.

Aparato Eléctrico y Electrónico (subíndice i)	Total de equipos estimado	Probabilidad de desecho del equipo	Pronóstico de desecho para el período (septiembre 2013-septiembre 2014)
Refrigerador	243022	0.2741	66612
Lavadora	206888	0.226	46757
Secadora de ropa	72269	0.1079	7798
Aire acondicionado minisplit	335838	0.0506	16993
Aire acondicionado de ventana	192717	0.3382	65177
Microondas	212556	0.16	34009
Computadora de escritorio	148081	0.3254	48186
Impresora	118323	0.3114	36846
Teléfono fijo	201220	0.2746	55255
Pantalla plana chica (menos de 25")	117614	0.1506	17713
Pantalla plana grande (más de 32")	188466	0.0451	8500
Tv rayos catódicos chica (17")	65892	0.3656	24090
Tv rayos catódicos grande (más de 21")	109821	0.2516	27631
Equipo de video	177839	0.2988	53138
Consola de videojuego	119740	0.2485	29755
Cámara digital	168628	0.2017	34012
Teléfonos celulares	644753.2	0.48	309482
Tabletas electrónicas	83605.36	0.08	6688
Computadoras portátiles	220349.72	0.12	26442
Otros:	109821	0.3613	39678

La tabla IV presenta la comparación entre la probabilidad de desuso anual basada en el tiempo de vida y la frecuencia encontrada experimentalmente. En todos los casos la frecuencia experimental es mucho mayor que la teórica, llegando casi a quintuplicarla.

TABLA IV. COMPARACIÓN DE PROBABILIDAD DE DESECHO DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS.

Aparato Eléctrico y Electrónico (subíndice i)	Tiempo de vida del equipo electrónico en años	Probabilidad de desecho del equipo calculada de acuerdo al tiempo de vida	Probabilidad muestral de desecho del equipo (Modelo de predicción).
Refrigerador	15	0.06	0.2741
Lavadora	13	0.07	0.226
Televisor	13	0.07	0.16
Computadoras de escritorio	7	0.14	0.32
Teléfonos celulares	4	0.25	0.48

Finalmente, en un intento de acercarse al impacto al medio ambiente y la salud que generan los residuos electrónicos, se hizo la estimación de las cantidades de plomo siguiendo las expresiones (7) y (8) del modelo de predicción (Tabla V). La masa unitaria de plomo se tomó del trabajo de Román (2007). Los resultados obtenidos muestran que, en total, los televisores de rayos catódicos y las computadoras de escritorio son los que representan un mayor problema ambiental dado las cantidades de plomo generadas al desechar estos equipos, que representan cerca del 100% del total de plomo contenido en los equipos analizados.



TABLA V. CANTIDAD DE PLOMO GENERADA POR EL DESUSO DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS EN CULIACÁN DE ROSALES.

Aparato Eléctrico y Electrónico (subíndice i)	Pronóstico de desecho para el período (septiembre 2013-septiembre 2014)	Masa unitaria de plomo (Kg)	Total de plomo por equipo electrónico (Kg)
Tv rayos catódicos	51721	1.81	93615.01
Computadora de escritorio	48186	1.26	60714.36
Computadora portátil	26442	0.007	185.094
Teléfono celular	309481	0.000435	134.624235
<b>Total de plomo desechado en equipos electrónicos (Septiembre 2013-Septiembre 2014)</b>			<b>154649.0882</b>

Un análisis similar puede realizarse para las demás sustancias nocivas, así como de los materiales que tienen un valor que puede comercializarse, con lo cual las empresas recicladoras pueden hacer un estudio de valorización de los recursos que se pueden extraer de los residuos electrónicos.

## V. CONCLUSIONES

Consideramos que el resultado fundamental de este trabajo de investigación es la metodología propuesta, desde el instrumento de captación de datos hasta los modelos aplicados. Tomando como referencia los resultados preliminares y la experiencia adquirida en el proceso de esta investigación, se pueden adelantar las siguientes conclusiones:

-Es posible crear un modelo matemático que, en una región determinada, describa dinámicamente la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, y de las sustancias nocivas a la salud y al ambiente que ellos contienen.

-Junto con los pronósticos de ventas, los datos que el modelo requiere para ser operacional pueden obtenerse de una encuesta en hogares, con una duración de aproximadamente 20 minutos por cada hogar entrevistado. Poco menos de 400 hogares constituye una muestra representativa de la población, pero si se desean obtener conclusiones específicas para diferentes niveles de marginación, se requeriría una muestra varias veces mayor.

-Si el modelo se crea a partir de una sola encuesta, su capacidad de predicción estaría limitada a los años inmediatos. Un modelo robusto en el tiempo requiere la realización de varias encuestas distribuidas durante los próximos años, que permitan una caracterización dinámica de algunos de los parámetros, ya que el desuso de algunos aparatos, depende de la mercadotecnia y de los avances tecnológicos.

-Trabajos ulteriores y encuestas más representativas (pero similares en esencia), permitirían caracterizar el comportamiento de los distintos niveles de marginación en cuanto a la generación de RAEE. Esto sería un insumo para el diseño de un sistema de recolección.

-Los resultados preliminares que se presentan en este trabajo pueden tener una utilidad importante para el desarrollo de estrategias de recolección de residuos electrónicos a nivel municipal. Estudios de más amplio rango realizados de acuerdo con la metodología aquí propuesta podrán aspirar a un impacto estatal o nacional.

-Aunque los datos son locales, la metodología tiene aplicación en diversos escenarios. Esto nos lleva a proponer estudios futuros en los que se considere el nivel rural, urbano y fronterizo, así como escalar el presente acercamiento a nivel nacional

Para resolver un problema es necesario primero identificarlo y, si es posible, caracterizarlo cuantitativamente. Este trabajo muestra que existe esa posibilidad para el peligro de los RAEE. Somos optimistas. La mitigación del daño ambiental producto de los residuos electrónicos es factible teniendo como paradigmas el desarrollo sustentable, la responsabilidad extendida del productor y la educación ambiental, elementos todos de políticas públicas que deben fundamentarse científicamente, y contar con procedimientos de evaluación y análisis cualitativos y cuantitativos.

## REFERENCIAS

- Acevedo Mascarúa, Joaquín, Rivas Rodríguez, Erick, Carrillo Gamboa, Olivia, (2008). Diagnóstico regional sobre la generación de residuos electrónicos al final de su vida útil en la región Noreste de México, INE-ITESM, Monterrey, México.
- Araújo, M. G., Magrini, A., Mahler, C. F., & Bilitewski, B. (2012). A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 32(2), 335–42. doi:10.1016/j.wasman.2011.09.020
- Bereketli, I., Erol Genevois, M., Esra Albayrak, Y., & Ozyol, M. (2011). WEEE treatment strategies' evaluation using fuzzy LINMAP method. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 71-79 pp.
- Brown-West, B. M., Gregory, J. R., & Kirchain, R. E. (2010). Modeling electronic waste recovery systems under uncertainty. *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST 2010*.
- Chancerel, P., & Rotter, S. (2009a). Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(8), 2336–52. doi:10.1016/j.wasman.2009.04.003
- Chancerel, P., & Rotter, V. S. (2009b). Assessing the management of small waste electrical and electronic equipment through substance flow analysis: the example of gold in Germany and the USA. *Revue de Métallurgie*, 106(12), 547-553.
- Chung, S.-S., & Zhang, C. (2011). An evaluation of legislative measures on electrical and electronic waste in the People's Republic of China. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 31(12), 2638–46. doi:10.1016/j.wasman.2011.07.010
- Cruz Sotelo, Samantha, Ojeda Benítez, Sara, Bovea, María Dolores, Santillán Soto, Néstor, Favela Ávila, Hugo, Aguilar Salinas, Wendolyn E., (2013). Hábitos y prácticas de consumo de teléfonos celulares en México y España, *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29, 33-41 pp.
- Cruz Sotelo, Samantha, Castro Rodríguez, Juan Ramón, Bovea, María Dolores, Ojeda Benítez, Sara, Lozano Olviera, Gabriela, (2010). Perfiles sociodemográficos en el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos: un análisis preliminar para el uso de herramientas de inteligencia artificial, 3er Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos.
- Gamberini, R., Gebennini, E., Manzini, R., & Ziveri, A. (2010). On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 937-951.
- Gavilán García, A., Román Moguel, G., Meraz Cabrera, L., Acevedo, J. (2011). Policy options for the management of end of life computers in Mexico, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/s10098-011-0430-9
- Gavilán García, Arturo, (2013). Evaluación y desarrollo de un sistema de manejo de la etapa final de vida de los residuos post-consumo de equipo de cómputo en México, Tesis Doctoral, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre el Medio Ambiente, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Gomes Salema, Maria Isabel, Barbosa Povoas, Ana, Novais, Augusto Q., (2009). An Eco-Efficiency Study for a WEEE Recovery Network: The Portuguese Case, 10<sup>th</sup> International Symposium on Process Systems Engineering, Elsevier, 2073-2078 pp.
- González Ávila, María Eugenia (2012). Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Propuesta y alternativas para una gestión sostenible, El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, B.C., 122 pp.
- González Llera, Ricardo, (2004). Integrated Electronic Waste Management in Mexico: Law, Technology and Public Policy, Tesis Doctoral, Department of Urban Studies and Planning, Massachusetts Institute of Technology, Estados Unidos de América.

- Hischier, R., Wäger, P., & Gaughhofer, J. (2005). Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 525–539. doi:10.1016/j.eiar.2005.04.003
- Huang, P., Zhang, X., & Deng, X. (2006). Survey and analysis of public environmental awareness and performance in Ningbo, China: a case study on household electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 14(18), 1635–1643. doi:10.1016/j.jclepro.2006.02.006
- Huisman, Jaco, (2003). The QWERTY / EE Concept. Quantifying Recyclability and Eco-efficiency for End-of-Life Treatment of Consumer Electronic Products, DfS, Países Bajos, 349 pp.
- INE, (2011). Elaboración de un documento integrado de la información generada de los proyectos nacionales y la experiencia de otros países en materia de residuos electrónicos, México, en: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2011\\_proyectos\\_res\\_elec.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2011_proyectos_res_elec.pdf)
- Kahhat, R., Kim, J., Xu, M., Allenby, B., Williams, E., & Zhang, P. (2008). Exploring e-waste management systems in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(7), 955–964. doi:10.1016/j.resconrec.2008.03.002
- Kahhat, R., & Williams, E. (2012). Materials flow analysis of e-waste: Domestic flows and exports of used computers from the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 67–74. doi:10.1016/j.resconrec.2012.07.008
- Kang, H.-Y., & Schoenung, J. M. (2005). Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. *Resources, Conservation and Recycling*, 45(4), 368–400. doi:10.1016/j.resconrec.2005.06.001
- Kang, H.-Y., & Schoenung, J. M. (2006). Estimation of future outflows and infrastructure needed to recycle personal computer systems in California. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 1165–74. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.03.062
- Kim, J., Hwang, Y., Matthews, H.S., Park, K., (2004). Methodology for recycling potencial evaluation criterion of waste home appliances considering environmental and economic factor. *IEEE*, 68-73.
- Khetriwal, D. S., Kraeuchi, P., & Widmer, R. (2009). Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration - learning from the Swiss experience. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 153–65. doi:10.1016/j.jenvman.2007.08.019
- Koh, S. C. L., Gunasekaran, a., & Tseng, C. S. (2012). Cross-tier ripple and indirect effects of directives WEEE and RoHS on greening a supply chain. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 305–317. doi:10.1016/j.ijpe.2011.05.008
- Lee, J., Song, H. T., & Yoo, J.-M. (2007). Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(4), 380–397. doi:10.1016/j.resconrec.2007.01.010
- Lepawsky, Josh, McNabb, Chris, (2010). Mapping international flows of electronic waste, *The Canadian Geographer* 54(2), 177-195.
- Machado, V. H., Barroso, A. P., Barros, A. R., & Machado, V. C. (2010). Waste Electrical and Electronic Equipment Management . A Case Study, 250–254.
- Mallawarachchi, H., & Karunasena, G. (2012). Electronic and electrical waste management in Sri Lanka: Suggestions for national policy enhancements. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 44–53. doi:10.1016/j.resconrec.2012.08.003
- Maria, R., Alves, D. B., Augusto, C., Gomes-salema, M. I., Barbosa-povoa, A., & Novais, A. Q. (2009). *An Eco-Efficiency Study for a WEEE Recovery Network: The Portuguese Case* (Vol. 27, pp. 2073–2078). Elsevier Inc. doi:10.1016/S1570-7946(09)70736-9
- Matkowski, P., & Friedel, K. (2008). Management of waste electrical and electronic equipment in Poland - Ecological, organizing and economical aspects. *2008 International Students and Young Scientists Workshop - Photonics and Microsystems, STYSW 2008*, 50–52.
- McKerlie, K., Knight, N., Thorpe, B., (2006). Advancing extended producer responsibility in Canada. *Journal of Cleaner Production* 14, 616-628.
- Ni, K., Lu, Y., Wang, T., Shi, Y., Kannan, K., Xu, L., Li, Q., y Liu, S., (2013). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in China: Policies and recommendations for sound management of plastics from electronic wastes, *Journal of Environmental Management*, 115, 114-123 pp.

- Nixon, H., Saphores, J., & Shapiro, A. A. (2007). Electronic Waste Recycling Preferences in California : The Role of Environmental Attitudes and Behaviors, 251–256.
- Ongondo, F.O., Williams, I.D., Cherrett, T.J., (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes, *Waste Management* 31, 714-730.
- Othman, N., Mohd Sidek, L., Ahmad Basri, N. E., Muhd Yunus, M. N., & Othman, N. a. (2009). Electronic plastic waste management in Malaysia: The potential of waste to energy conversion. *ICEE 2009 - Proceeding 2009 3rd International Conference on Energy and Environment: Advancement Towards Global Sustainability, 2005*(December), 337–342.
- Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J., van Nunen, J. a. E. ., & Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains: the WEEE case. *International Journal of Production Research*, 48(15), 4463–4481. doi:10.1080/00207540902906151
- Queiruga, D., Walther, G., González Benito, J., Spengler, T., (2008). Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management* 28, 181-190.
- Queiruga, D., González Benito, J., & Lannelongue, G. (2012). Evolution of the electronic waste management system in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 24, 56–65. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.043
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *The Science of the Total Environment*, 408(2), 183–91. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.09.044
- Román Moguel, Guillermo J., (2007a). Diagnóstico sobre la generación de Residuos Electrónicos en México, INE-IPN-CIEMAD, México, D.F.
- Román Moguel, Guillermo J., (2007b). Desarrollo de un programa modelo para el manejo de residuos electrónicos en México, INE-IPN-CIEMAD, México, D.F.
- Román Moguel, Guillermo J., (2010). Diagnóstico regional de residuos electrónicos en dos ciudades de la frontera norte de México: Tijuana y Ciudad Juárez, INE-CIEMAD, México, D.F.
- Rousis, K., Moustakas, K., Malamis, S., Papadopoulos, a, & Loizidou, M. (2008). Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 28(10), 1941–54. doi:10.1016/j.wasman.2007.12.001
- Saphores, J. D. M., Ogunseitan, O. A., & Shapiro, A. A. (2012). Willingness to engage in a pro-environmental behavior: an analysis of e-waste recycling based on a national survey of US households. *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 49-63.
- Shinkuma, T., & Managi, S. (2010). On the effectiveness of a license scheme for E-waste recycling: The challenge of China and India. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(4), 262–267. doi:10.1016/j.eiar.2009.09.002
- Silva, Uca, (2009). Gestión de residuos electrónicos en América Latina, ediciones SUR, Chile, 299 pp.
- Steubing, B., Böni H., Schlupe, M., Silva, U., Ludwing, C. (2010). Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis. *Waste Management* 30, 473-482.
- Shan Khan, Safdar, Aziz Lodhi, Sulema, Akhtar, Faiza, y Khokar, Irshad, (2014). Challenges of waste of electric and electronic equipment (WEEE). Toward a better management in a global scenario, *Management of Environmental Quality; An International Journal*, 25 (2), 166-185 pp.
- Taurino, R., Pozzi, P., & Zanasi, T. (2010). Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 30(12), 2601–7. doi:10.1016/j.wasman.2010.07.014
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 436–458. doi:10.1016/j.eiar.2005.04.001
- Yang, Y., Zhang, J., & Feng, W. (2010). A prediction on electronic waste resource with time series model. *ICCA SM 2010 - 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, Proceedings*, 2(Iccasm), 551–555.
- Yu, J., Williams, E., Ju, M., & Shao, C. (2010). Managing e-waste in China: Policies, pilot projects and alternative approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 991–999. doi:10.1016/j.resconrec.2010.02.006

Zoeteman, B. C. J., Krikke, H. R., & Venselaar, J. (2009). Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 415–436. doi:10.1007/s00170-009-2358-3