

## MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA PRODUCCIÓN Y EL CONSUMO SOSTENIBLES EN MÉXICO

J. D. Pérez Hurtado<sup>1</sup>  
E. G. Toriz García<sup>2</sup>

### RESUMEN

El actual sistema de producción, consumo y de gestión de residuos, impone cada vez mayor presión sobre los recursos naturales finitos, acelera el crecimiento de los costos de extracción y disponibilidad de materias primas y exacerba la degradación ambiental que se produce por la explotación de recursos y la contaminación. En el largo plazo, este modelo es insostenible.

El presente trabajo de investigación ha emprendido la ambiciosa tarea de diseñar un sistema de producción y consumo que siga los principios de la Economía Circular adaptada a México. Para ello, se ha desarrollado un modelo de Dinámica de Sistemas aplicado al mercado de productos electrónicos. Para propósitos de la investigación se ha seleccionado un tipo particular de producto (lámparas fluorescentes compactas) que por sus características es susceptible de ser gestionado bajo el concepto de Economía Circular.

Como resultado, se ha obtenido un modelo que integra la cadena de valor del mercado de lámparas fluorescentes compactas en un sistema de Economía Circular, siendo sus principales elementos: (1) la cadena de logística inversa de empresas recolectoras/recicladoras de residuos, (2) el modelo de negocio del fabricante/distribuidor de lámparas, (3) la política de gestión de residuos basada en un esquema financiero de cuota/subsidio y (4) la participación de las personas la de gestión de residuos.

### ANTECEDENTES

Una transformación estructural de los patrones de producción y consumo que rigen a los mercados actuales debería considerar los siguientes principios: (1) desincentivar la generación de residuos, (2) crear estímulos económicos para que los materiales mantengan su valor, (3) propiciar la recirculación de materiales a través del reuso y el reciclaje, (4) reducir la extracción y uso de materiales vírgenes, (5) aumentar el aprovechamiento de las capacidades energéticas de los residuos, (6) evitar que los residuos impacten negativamente la salud humana y el medio ambiente, y (7) contribuir al uso sostenible de los recursos materiales utilizados en la producción.

Diseñar un nuevo sistema capaz de operar bajo estos principios, equivale a poner en operación un modelo de Economía Circular, esto es, un sistema de producción y consumo que elimina los residuos al aprovecharlos como materia prima en los nuevos ciclos productivos; que desvincula el crecimiento económico de la degradación ambiental; y que minimiza -o elimina- el uso de sustancias tóxicas en la fabricación de productos (Ellen Macarthur Foundation , 2013).

En una Economía Circular, los materiales no quedan inutilizados cuando un producto termina su vida útil, en cambio, éstos regresan cíclicamente a las cadenas productivas en forma de materia prima de buena calidad que requiere un mínimo procesamiento y uso de energía para hacer posible su reutilización en la fabricación de nuevos productos (Ellen Macarthur Foundation , 2013). A diferencia del modelo económico actual, que es lineal

<sup>1</sup> Profesor de Cátedra. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México. [jdph@itesm.mx](mailto:jdph@itesm.mx)

<sup>2</sup> Profesor de Cátedra. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México. [etoriz@itesm.mx](mailto:etoriz@itesm.mx)

(extrae - consume - genera residuos - desecha), este nuevo modelo es circular (no existen residuos).

En México, derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, el Gobierno Federal oficializó el Programa Especial de Producción y Consumo Sustentables (PEPyCS) 2014-2018, un instrumento de política que establece las directrices para que todos los sectores productivos del país participen en la adopción de “patrones que reduzcan la dependencia en los recursos naturales, la generación de emisiones y residuos, e impulsen el reciclaje y el reúso de materiales, haciendo sustentables [las] cadenas productivas” (Gobierno Federal, 2014, p. 3).

Para que las políticas nacionales y locales de México se alineen con las nuevas directrices establecidas en los estándares internacionales, así como en el PEPyCS, se requiere realizar cambios estructurales, profundos, en los sistemas que actualmente operan.

En el presente trabajo de investigación se utiliza la Dinámica de Sistemas para desarrollar un modelo de producción, consumo y de gestión de residuos en México, que sirva como una herramienta en el posterior proceso de diseño, planeación y evaluación de políticas públicas que será necesario realizar en el país para transitar hacia patrones de Consumo y Producción Sostenibles. Para propósitos de la investigación, se decidió focalizar el modelo aplicándolo a la gestión de residuos de lámparas fluorescentes compactas (LFCs) en México, ya que comprenden un tipo de producto que incorpora características que lo hacen susceptible de ser gestionado dentro del sistema de Economía Circular.

### **Objetivo**

Desarrollar un modelo de Dinámica de Sistemas basado en la aplicación de la Economía Circular sobre la producción, el consumo y la gestión de residuos de LFCs en México, con la finalidad de disponerlo como herramienta de referencia para los diseñadores de políticas públicas en esta materia.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el modelo de operación de la Economía Circular.
- Analizar las directrices establecidas en los estándares internacionales en materia de Producción y Consumo Sostenibles.
- Establecer un diagrama causal que represente la aplicación de los principios de la Economía Circular a la cadena productiva del mercado de LFCs en México.
- Desarrollar un modelo de Dinámica de Sistemas que represente el diagrama causal elaborado.
- Incorporar la visión del Desarrollo Sostenible en el modelo de Dinámica de Sistemas.
- Identificar y proponer acciones que podrían implementarse en el corto plazo para mejorar el sistema actual gestión de residuos de LFCs en México.

### **Variables y términos**

Como parte del modelo desarrollado, ha sido necesario el uso de las variables mostradas en la Tabla 1. Otras variables auxiliares y constantes han sido necesarias en la definición completa del modelo, las mostradas en la Tabla 1 son las principales.

## METODOLOGÍA

### Hipótesis

Si se diseña un sistema de Economía Circular modelado a partir de la Dinámica de Sistemas, se pueden definir correctamente las políticas locales necesarias para transformar el mercado de LFCs en un sistema de producción y consumo sostenibles.

### Especificación de variables

Las variables principales del modelo se definen siguiendo la metodología de Dinámica de Sistemas; éstas se muestran en la Tabla 1 y forman parte de las ecuaciones mostradas más adelante.

Tabla 1. Variables y símbolos de las ecuaciones de los flujos del modelo de Economía Circular.

Variable	Símbolo
Personas enteradas	$P_e$
Tasa de recuperación de residuos por persona	$T_{rp}$
Residuos recuperados por las empresas	$R_{re}$
Volumen de material entregado por las personas	$V_{ep}$
Peso de una LFC	$P_L$
Fracción vendida localmente	$f$
Valor de mercado de los residuos de LFCs	$V_{mrl}$
Costo de operación reciclador/recolector	$C_{or}$
Costos de operación del Subsidio	$C_{os}$
Variable auxiliar 1	$a_1$
Ingresos del recolector/reciclador	$I_{rr}$
Costo de recolección Municipal	$C_{rm}$
Costo al fabricante de LFCs por subsidio	$C_{fs}$
Costos materiales	$C_m$
Costos no materiales	$C_{nm}$
Factor 1	$f_1$
Tiempo de vida LFC	$t_{vl}$
Factor 2	$f_2$
Tasa base de degradación de calidad	$t_{bdc}$
Durabilidad de los materiales de los residuos	$d_{mr}$

### Diseño de la investigación

La investigación se ha diseñado con base en la estructura que se presenta a continuación:

1. Investigación documental.
  - Bibliográfica.
  - Hemerográfica.
  - Consulta en revistas especializadas y en medios electrónicos.
  - Antecedentes sobre el tema de investigación.

2. Selección de los referencias.
  - Selección de diferentes diagramas causales de referencia.
3. Adecuaciones de los diagramas de referencia.
  - Realización de mejoras y/o modificaciones para adaptar los diagramas de referencia al contexto de la investigación.
4. Conceptualización del modelo.
  - Diseñar el diagrama causal completo del sistema.
5. Desarrollo del modelo.
  - Conversión del diagrama causal en un modelo de Dinámica de Sistemas.
6. Validación cualitativa del modelo.
  - Eliminación de inconsistencias y definición de parámetros a cuantificar.
7. Análisis y discusión.
8. Redacción de conclusiones.

### Procedimiento

Se ha seguido la metodología de Dinámica de Sistemas para cumplir el objetivo de este trabajo de investigación, que consiste en aplicar la fase cualitativa del método (fase conceptual, en términos de lo mostrado en la Figura 1) para el desarrollo de un sistema de producción, consumo sostenible en el mercado de LFCs en México.

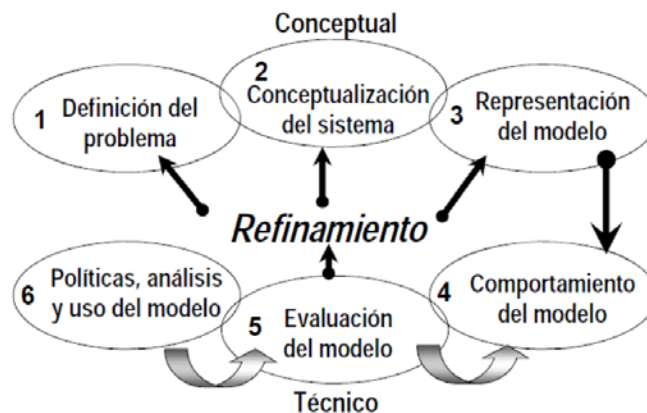


Figura 1. Esquema de la metodología de Dinámica de Sistemas.

Fuente (García, 2009).

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El sistema de Economía Circular es la directriz para elaborar el modelo de la presente investigación. El modelo elaborado incorpora los siguientes elementos:

- (1) alineación con las directrices nacionales e internacionales de la Producción y el Consumo Sostenibles,
- (2) principios fundadores y operacionales de la Economía Circular,
- (3) cadena de logística inversa como las utilizadas en la gestión de residuos electrónicos,

(4) modelo de negocio de fabricantes de aparatos electrónicos, (5) impactos ambientales del reciclaje de LFCs, (6) impactos ambientales de las LFCs incluyendo aspectos de diseño del producto, (7) programas de gestión de residuos que incluyen incentivos económicos hacia los fabricantes/distribuidores, (8) posicionamientos del Gobierno y de la iniciativa privada en la gestión de residuos y (9) participación de las personas en la gestión de residuos provenientes de los hogares.

Luego de analizar estos elementos, se ha elaborado tres diagramas causales por separado, mismos que posteriormente se han integrado un solo diagrama global que representa el sistema de Economía Circular aplicado a la industria de LFCs en México. Los tres diagramas causales elaborados por separado (también llamados, sub-modelos), son:

*I. Diagrama causal de la gestión de residuos en el sistema de Economía Circular:* mide el desarrollo de la industria del reciclaje en términos del número de empresas de recolección y reciclaje así como de la cantidad (volumen) de residuos de LFCs que se reciclan, así como de la administración de los recursos económicos por medio de un subsidio que es la entidad encargada de administrar el sistema de gestión de residuos.

*II. Diagrama causal de la cadena de logística inversa en el sistema de Economía Circular:* incluye la medición de (1) los costos de operación de la empresa de recolección/reciclaje, (2) los ingresos que obtiene por la venta de residuos reciclados al fabricante de LFCs, (3) las utilidades que genera, y (4) la disponibilidad de residuos provenientes de los hogares. Asimismo, mide cómo estas actividades influyen en la disminución de la generación de residuos y en la determinación del monto del subsidio para el sistema de gestión.

*III. Diagrama causal del modelo de negocios del fabricante/distribuidor de LFCs:* éste incluye aspectos económicos, ambientales y operativos inherentes al funcionamiento de una empresa fabricante/distribuidora de LFCs, así como aspectos relativos al diseño del producto. Entre los parámetros que se miden en este sub-modelo, se encuentran: los costos materiales y no materiales para la producción de lámparas, la cantidad de unidades que se desplazan en el mercado, las utilidades que genera la venta de LFCs, los criterios que influyen en el establecimiento del precio de venta del producto y los criterios que el fabricante considera al momento de diseñar el producto (como el tiempo de vida del producto, la calidad de los materiales con que fabrica, la facilidad que éstos presentan para ser reciclados, así como las estrategias de publicidad para la venta de sus productos).

Integrando los diagramas causales de los tres sub-modelos mencionados, se obtiene el modelo total a través de un diagrama causal unificado en el que se exponen las relaciones existentes entre todos los elementos analizados. Este diagrama unificado, de acuerdo con la metodología de Dinámica de Sistemas, debe convertirse en un diagrama de Forrester, ver Figura 2, lo que significa obtener el modelo de Dinámica de Sistemas que representa el comportamiento del sistema de Economía Circular diseñado.

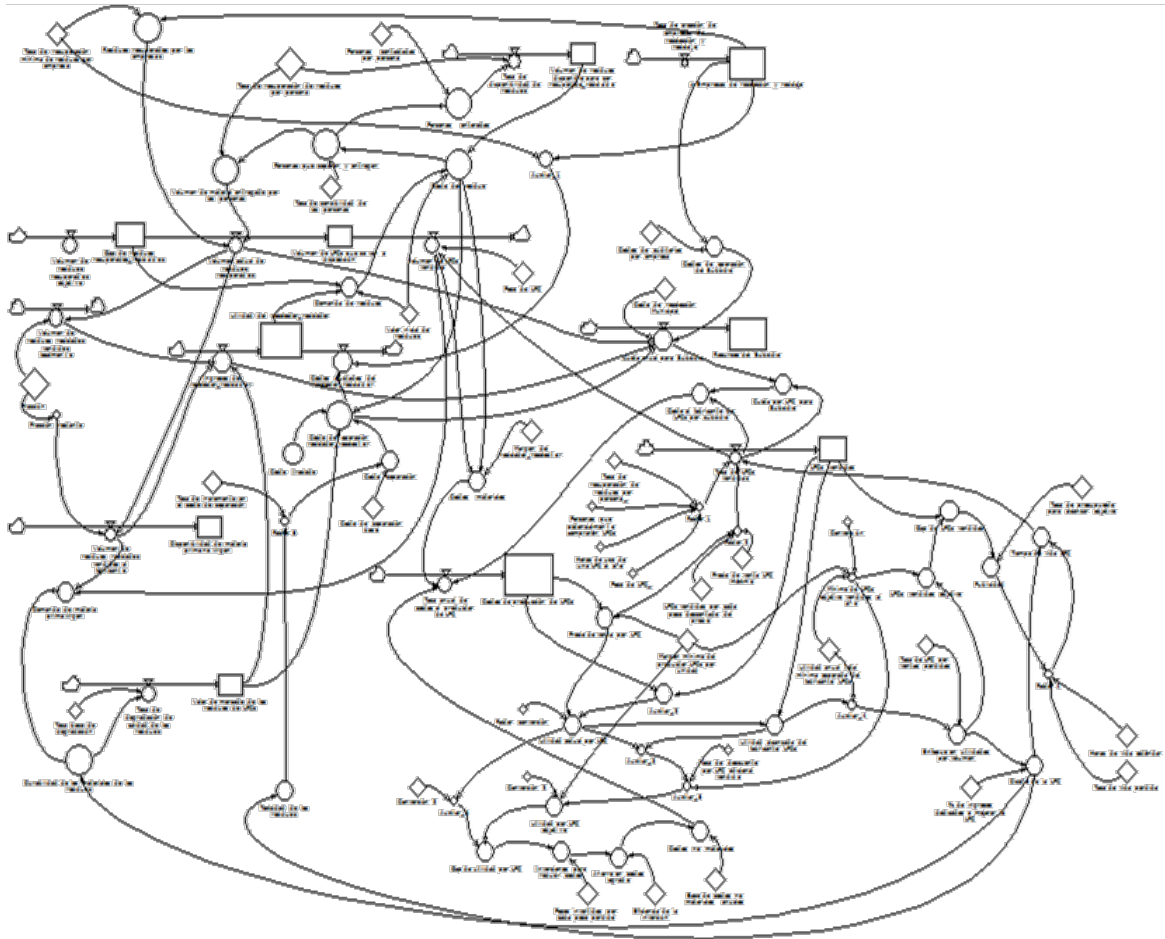


Figura 2. Modelo de Dinámica de Sistemas de la Economía Circular aplicada a la Producción, el Consumo y la Gestión de Residuos en la Industria de LFCs en México.

**Niveles, flujos y ecuaciones del modelo**

La terminología utilizada en los modelos de Dinámica de Sistemas incorpora el uso de tres elementos: niveles, flujos y variables auxiliares. Las relaciones que se establecen entre ellos, se describe así: los niveles sólo pueden cambiar su valor en función de los flujos, los cuales pueden ser positivos (incrementan el nivel) o negativos (disminuyen el nivel); las variables auxiliares definen valores establecidos en las condiciones iniciales del sistema y relacionan niveles y flujos.

En un modelo de Dinámica de Sistemas, los niveles son, para fines de análisis, el elemento más representativo porque permiten medir el estado del sistema en cualquier instante en el tiempo.

Los niveles que se ha definido para el modelo en cuestión se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles del modelo de Dinámica de Sistemas desarrollado.

Nivel	Unidad de medida	Flujo asociado
Volumen de residuos disponibles para recuperar y reciclar	kg	'Tasa de disponibilidad de residuos'
Gap de residuos recuperados/reciclados	kg	'Volumen actual de residuos recuperados'; 'Volumen de residuos recuperados objetivo'
Volumen de LFCs que se van a disposición final	kg	'Volumen de LFCs vendido'; 'Volumen actual de residuos recuperados'
Utilidad del recolector/reciclador	\$	'Ingresos del recolector/reciclador'; 'Costos del recolector/reciclador'
Recursos del Subsidio	\$	'Cuota anual para Subsidio'
Disponibilidad de materia prima no virgen para el fabricante LFCs	kg	'Volumen de residuos reciclados vendidos al fabricante de LFCs'
Valor de mercado de los residuos de LFCs	\$/kg	'Tasa de degradación de calidad de los residuos'
Costos de producción de LFCs	\$	'Tasa anual de costos al fabricante/distribuidor de LFCs'
LFCs vendidas	unidades	'Tasa de LFCs vendidas'
Empresas de recolección/reciclaje	#empresas	'Tasa de creación de empresas de reciclaje/recolección'

Las ecuaciones del modelo representan las instrucciones necesarias para que la computadora interprete las interacciones que suceden entre los elementos del sistema. Una ventaja adicional que presentan los modelos de Dinámica de Sistemas es que, a pesar de la inherente complejidad de las interacciones que establecen los elementos, basta con escribir ecuaciones simples sobre el diagrama de Forrester.

Las ecuaciones para cada uno de los flujos que modifican los niveles previamente presentados, son:

$$TDR = (P_e)(T_{rp}) \quad (1)$$

$$VRA = R_{re} + V_{ep} \quad (2)$$

$$VL = (P_L)(T_{LFV}) \quad (3)$$

$$VLVL = (VRA)(f) \quad (4)$$

$$IR = (VLVL + VLVF)(V_{mrl}) \quad (5)$$

$$CR = (C_{or})(a_1) \quad (6)$$

$$CAS = C_{os} - I_{rr} + (C_{rm} + C_{or})(VRA) \quad (7)$$

$$VLVF = (VRA)(1 - f) \quad (8)$$

$$TCF = C_{fls} + C_m + C_{nm} \quad (9)$$

$$TLV = f_1/t_{vl} - f_2 \quad (10)$$

$$TDC = (t_{bac})(1 - d_{mr}) \quad (11)$$

Las ecuaciones formuladas son consistentes, lo que significa que el modelo desarrollado, en su estado actual, puede correr sin errores en el software "Powersim" versión 8. No obstante,

como se ha enfatizado antes, el comportamiento que se observaría distaría de la realidad debido a que se han asignado valores iniciales arbitrarios a las variables, mismas que deben ser cuantificadas utilizando los métodos y fuentes de información correctos según sea necesario de acuerdo a los objetivos de la investigación.

### **Uso del modelo**

El modelo desarrollado es una herramienta sobre la que deberá trabajarse posteriormente no sólo en su refinamiento sino, sobre todo, en el proceso de diseño y definición de políticas públicas que podrían instrumentarse en nuestro país para transformar este mercado en un sistema con patrones de Producción y Consumo Sostenibles.

Es importante enfatizar que el modelo de computadora obtenido corresponde a lo que, bajo la metodología establecida por Sterman en (2004), se conoce como Dinámica de Sistemas Cualitativa. Hasta este punto, el modelo está descrito según una serie de ecuaciones (interacciones) definidas por variables (elementos) que pueden ser medidas. A partir de aquí, el modelo puede llevarse a las fases de Dinámica de Sistemas Cuantitativa donde se asignan valores a cada una de las variables, se corren simulaciones, se analizan resultados y se hace un refinamiento del modelo según sea necesario de acuerdo a los objetivos de la investigación.

### **CONCLUSIONES**

1. La Producción y Consumo Sostenibles implican la redefinición de todas las actividades involucradas en las cadenas de valor de los productos, desde la extracción hasta el término de la vida útil.
2. Transitar hacia patrones de Producción y Consumo Sostenibles no es opcional, todos los indicadores, en cualquier parte del mundo, apuntan a la degradación ambiental y a la escasez de recursos si continua operando el modelo económico actual.
3. La Economía Circular es un modelo económico, social y ambiental que hace posible la transición hacia patrones de Producción y Consumo Sostenibles.
4. El modelo desarrollado en esta investigación abarca todos los aspectos, parámetros, criterios y relaciones que comprenden un sistema de Economía Circular, como son: usuarios, proveedores, empresas privadas, Gobierno, costos, ingresos, utilidades, flujos de materiales, márgenes de utilidad, competencia, precios de venta, entre otros. Pero además incluye aspectos sociales: participación de las personas en la separación y reciclaje de residuos y los criterios que definen su participación. Asimismo, incluye aspectos ambientales: generación de residuos, tasas de reciclaje y recolección, criterios de diseño de productos para prevenir la contaminación y uso de sustancias tóxicas.
5. Por tanto, se ha conseguido estructurar un modelo para toda la cadena de valor de la industria de lámparas fluorescentes compactas en México incorporando las tres dimensiones del Desarrollo Sostenible: económica, ambiental y social.
6. La Economía Circular representa una oportunidad para diseñar mejores sistemas de producción y consumo. Ciertamente es que su implementación requiere importantes cambios en las estructuras sociales y económicas actuales. Por ello, el uso de la Dinámica de Sistemas, ofrece un camino bien planeado para poder realizarlos.
7. El modelo de desarrollo que opera en el mundo, ha tenido pobres resultados cuando se mide la dimensión ambiental, económica y social. Claramente, no es posible seguir



- desarrollando una economía que, siendo dependiente de recursos naturales limitados, agote las fuentes de producción y degrade el entorno.
8. El modelo de Dinámica de Sistemas que se ha desarrollado en esta investigación, es novedoso en cuanto a que no se ha encontrado un trabajo similar en términos del propósito y alcance con que se ha abordado el problema aquí presentado.
  9. Por otro lado, no se ha encontrado que en México se haya utilizado modelos de Dinámica de Sistemas para el diseño de políticas públicas, en este sentido, el modelo aquí elaborado representa una gran oportunidad de transitar hacia una nueva y mejor forma de planear y hacer políticas.
  10. Cabe señalar que a pesar de que el modelo desarrollado se especializa en la industria de LFCs en México es posible que, modificándolo adecuadamente, sea aplicado en otros mercados, especialmente los relacionados con residuos electrónicos provenientes de los hogares. Un ejemplo oportuno es el remplazo de televisores analógicos por televisores digitales que actualmente está ocurriendo en el país como parte del suceso conocido como “apagón analógico”.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Ellen Macarthur Foundation . (08 de Julio de 2013). *The circular economy*. Retrieved 04 de Octubre de 2014 from Ellen Macarthur Foundation :  
<http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/circular-economy/the-circular-model-an-overview>
- Forrester, J. (Enero de 1995). Counterintuitive Behaviour of Social Systems. *Technology Review* , pp. D-4468.
- Forrester, J. (1998). Diseñando el Futuro. *Diseñando el futuro*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- García, J. (2009). *Theory and Practical Exercises of System Dynamics*. Barcelona: Juan Martín García.
- Gobierno Federal. (2014). *Estrategia Nacional de Producción y Consumo Sustentable*. México: SEMARNAT.
- New Zealand Ministry of Environment. (10 de Septiembre de 2009). *New Zealand lighting industry product stewardship scheme*. Retrieved 28 de Enero de 2014 from Ministry of Environment: <http://www.mfe.govt.nz/publications/waste/new-zealand-lighting-industry-product-stewardship-scheme-phase-1-assessment-and-0>
- Sterman, J. D. (2004). *Business Dynamics*. McGraw-Hill.
- US-China-EPA. (2012). *Recycling and Waste Electrical and Electronic Equipment Management in Taiwan: A Case Study*. EEUU: US-EPA.
- World Bank Group Global Environmental Facility Program. (2006). *Post-Implementation Impact Assessment Mexico-Ilumex Project*. Washignton, D.C.: World Bank Group Global Environmental Facility Program