

# Sanitario seco: una alternativa para el saneamiento básico en zonas rurales

## Dry toilets: a means of alternative sanitation

César A. García-Ubaque<sup>1</sup>, Martha L. Vaca-Bohórquez<sup>2</sup> y  
Juan C. García-Ubaque<sup>3</sup>

1 Facultad de Tecnológica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. cagarcaiu@udistrital.edu.co

2 Consultora. Investigadora Independiente. Bogotá, Colombia. ml.vaca68@uniandes.edu.co

3 Facultad de Medicina. Departamento de Salud Pública. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. jcgarciaiu@unal.edu.co.

Recibido 28 Marzo 2014/Enviado para Modificación 30 Mayo 2014/Aceptado 30 Junio 2014

### RESUMEN

**Objetivo** Evaluar el uso de sanitario seco en una zona rural en Colombia.

**Método** Por conveniencia se seleccionaron quince familias ubicadas en zona rural de un municipio de Cundinamarca. Con su acompañamiento se incorporó un elemento demostrativo en una de las viviendas durante cinco meses y se hizo una evaluación ex-post acerca de los aspectos técnicos y económicos asociados a su utilización.

**Resultados** El sanitario seco posee facilidad constructiva y muestra ventajas ambientales asociadas a menor contaminación de fuentes hídricas y menor uso de fertilizantes químicos. En el municipio estudiado los costos de su construcción y funcionamiento pueden representar un ahorro equivalente a \$ 616 973 456 (US\$ 308 487), frente a los sanitarios convencionales. Se encontraron barreras culturales para su utilización.

**Discusión** En muchos países existe en el sector rural un gran porcentaje de hogares que no cuentan con un sistema de alcantarillado para disponer los residuos humanos, lo cual genera desafíos importantes a nivel de salud ambiental y el cuidado de los ecosistemas. La alternativa propuesta es una solución ambientalmente aceptable desde la perspectiva técnica y económica, sin embargo y para que alcance la cobertura necesaria para generar un impacto relevante, deben trabajarse los factores de tipo social y cultural que generan percepciones y prejuicios sobre el manejo de excretas.

**Palabras Clave:** Salud ambiental, saneamiento básico, eliminación de excretas, compostaje, evaluación (*fuentes: DeCS, BIREME*).

### ABSTRACT

**Objective** Evaluating dry toilet use in a rural area of Colombia.

**Method** Fifteen families were selected by convenience sampling from the

rural area of a municipality in the Cundinamarca department in Colombia. A dry (composting) toilet was installed in one house and used for demonstration purposes over a five-month period. An ex-post evaluation was made concerning technical and economic matters.

**Results** A dry toilet is easy to construct/install and has environmental benefits associated with less contamination of water sources reduction and a reduced amount of chemical fertilizer. Dry toilets' construction and operating costs may represent savings of Col \$ 616 973 456 (US\$ 308 487) in the municipality being studied, compared to the costs involved in conventional toilet use. However, cultural barriers were found regarding their use.

**Discussion** A large percentage of households in many countries' rural sectors do not have a sewerage system for disposing of human waste. This situation creates significant challenges regarding environmental health and ecosystem conservation. Dry toilets represent an environmentally-acceptable solution from a technical and economic perspective; however, work is required concerning social and cultural factors producing cultural perceptions and prejudices about handling excreta to provide the necessary coverage and produce a significant impact on people's awareness.

**Key Words:** Environmental health, excreta disposal, composting toilet, basic sanitation (*source: MeSH, NLM*).

Los desafíos ambientales que la sociedad enfrenta en la actualidad constituyen una amenaza real al nivel de calidad de vida de una parte de la población y a la posibilidad de mejoramiento de las condiciones básicas en la gran mayoría de las comunidades que aún no logran satisfacer sus necesidades mínimas de salud y bienestar. De manera particular el manejo de residuos humanos (heces y orina) se ha constituido en una problemática central, que conlleva serias implicaciones para la salud humana y para la conservación y disponibilidad de servicios de los recursos naturales, especialmente en las zonas rurales.

Para el año 2013, el Departamento Nacional de Estadística DANE, reportó en la Encuesta Nacional de Calidad de Vida que a nivel nacional, el 74,2 % de los hogares colombianos cuentan con inodoros conectados a alcantarillado y en las cabeceras municipales el 91,9 % (1). Sin embargo, en este mismo documento se aprecia que fuera de las cabeceras municipales, solo un 14,8 % de los hogares tiene alcantarillado, un 54,7 % de ellos, maneja sus residuos humanos mediante pozos sépticos, un 11,7 % tiene inodoro sin conexión a ningún sistema de tratamiento, un 14,0 % no tiene servicio sanitario y un 4,9 % maneja otro tipo de sistemas (letrinas, bajamar, etc.); lo que implica que un 85,3 % de estos hogares está disponiendo de manera inadecuada sus residuos y considerando las dificultades de tipo

técnico y económico que implica llevar a cada uno de estos hogares un servicio de alcantarillado, las perspectivas de solución no parecen posibles. En la siguiente tabla se puede apreciar la situación del país por regiones.

**Tabla 1.** Porcentaje de hogares sin alcantarillado en Colombia. Año 2013

|                          | Hogares sin alcantarillado (%) |
|--------------------------|--------------------------------|
| Promedio Nacional        | 24,8                           |
| Región Atlántica         | 45,2                           |
| Región Oriental          | 29,1                           |
| Región Central           | 24,6                           |
| Región Pacífica          | 53,9                           |
| Bogotá                   | 0,3                            |
| Antioquia                | 21,1                           |
| Valle del Cauca          | 8,2                            |
| San Andrés y Providencia | 67,7                           |
| Orinoquía y Amazonía     | 4,3                            |

Fuente: (1)

La Tabla 1 permite apreciar que el país existen áreas cuya población que está disponiendo sus residuos humanos mediante mecanismos que ponen en un riesgo considerable tanto la salud humana, como la salud del ecosistema; se destacan las costas atlántica y pacífica (45,2 % y 53,9 % respectivamente).

Por otra parte, el tratamiento de residuos humanos utilizando descargas de agua potable para su transporte a fuentes hídricas, no parece la alternativa más eficiente, ya que por lo menos el 27 % del agua potabilizada se está utilizando en los sanitarios, junto con un 20 % que se pierde en los sistemas de distribución (2), y aún más preocupante es que el 3 % de la energía producida se gasta en el tratamiento de agua potable y de aguas residuales (3).

Se han probado diferentes opciones para reducir el consumo de agua en el tratamiento de desechos humanos como: la utilización de aguas lluvias y grises, el uso de sanitarios altamente eficientes y sanitarios secos, que al evaluarlas con criterios como ahorro de agua, costos de infraestructura, ahorro de energía y emisión de gases de efecto invernadero, la alternativa más conveniente resulta ser el sanitario seco (2,4). Adicionalmente, se ha encontrado que los desechos humanos (tanto heces como orina) tienen un valor potencial para ser aprovechados como fertilizantes o como combustibles, o incluso como fuente de proteína para animales, entre otros (5,6).

En los sanitarios convencionales, el agua se utiliza básicamente como un medio de transporte, que termina generando al final del proceso, los mismos residuos sólidos que deben ser tratados por diferentes medios como: disposición en rellenos sanitarios, tratamientos térmicos, disposición en suelos, u otros, sin olvidar que adicionalmente se debe realizar tratamiento al agua utilizada (3).

Diversos estudios han demostrado que la mejor condición para realizar el tratamiento de residuos, desde el punto de vista técnico-económico, es ejecutar los procedimientos “in situ”, disminuyendo al máximo el transporte y generando un ciclo favorable de aprovechamiento. Sin embargo, por tratarse de desechos humanos, los prejuicios culturales, la falta de conocimiento técnico-científico y el manejo de riesgos asociados, hacen que este tipo de soluciones enfrenten una enorme dificultad para ser desarrollados en forma masiva, de manera que produzcan impactos relevantes en las condiciones ambientales y de salud de las poblaciones comprometidas (7).

Una barrera social adicional, para el tratamiento “in situ” de los desechos humanos es que tradicionalmente se han puesto a prueba e investigado en zonas rurales y poblaciones vulnerables, por lo cual estos sistemas se asocian a condiciones de pobreza, sin apreciar las bondades que generan en términos de calidad de vida en todo el ciclo productivo (2).

Para materializar el uso de tecnologías de conservación de recursos y permitir que se vuelvan parte del quehacer de una comunidad, se deben conocer los factores que influyen la toma de decisiones por parte de los hogares (8). Características como nivel educativo, tamaño y composición de la familia, precio del agua, percepción del riesgo y hábitos, entre otros; se constituyen en elementos impulsores o perturbadores de estos procesos. Estas nuevas tecnologías requieren experimentación y un marco de aplicación para manejar la complejidad y la incertidumbre de la aceptación social. Tomar en cuenta solo los aspectos técnicos es insuficiente y lleva a grandes frustraciones y retrocesos en los objetivos de salud humana y salud ambiental; debe haber capacitación y acompañamiento (9).

Los sanitarios secos son un sistema de eliminación de excretas que no necesita agua y con el cual se puede obtener abono orgánico. El sistema plantea el uso de dos cámaras alternas una activa (en uso) y otra en reposo donde se da lugar a los procesos de desactivación y mortalidad constante de

organismos y patógenos. La primera patente para un inodoro de tierra, se registró en 1838 por Thomas Swinburne. Más tarde, Henry Moule empezó a experimentar enterrando sus heces en el jardín y después de 3 o 4 semanas, no había rastros del material enterrado, con lo cual dio inicio al diseño de su propio inodoro en el que se depositaba una cantidad determinada de tierra, que caía de una tolva ubicada detrás de la taza sobre las heces frescas. A principios de la década de 1980, el profesor Mats Wolgast del Karolinska Institutet, en Estocolmo, Suecia, desarrolló el sistema WM Ekologen, tipo ES, que, se basa en un proceso de deshidratación, diseñado para desviar la orina (7). Se han hecho desarrollos posteriores, pero con el mismo propósito de no utilizar agua y convertir los desechos humanos en un producto reciclable.

En el presente estudio se analizan los resultados de un estudio sobre tratamiento de residuos humanos mediante la construcción y operación de un sanitario seco, en la vereda San Miguel del municipio Mesitas del Colegio (Cundinamarca). Comprendió las siguientes etapas: a. Encuesta a la comunidad sobre hábitos de uso del sanitario y uso de compost en los cultivos de la zona, b. Capacitación a la comunidad para mostrar los beneficios del sanitario seco y recibir retroalimentación; c. Construcción de un sanitario seco como prototipo para evaluar la implementación del proceso; d. Operación del sanitario seco y toma de muestras de laboratorio, y; e. Análisis de costos de construcción y operación (10).

## MÉTODOS

El municipio Mesitas del Colegio, se encuentra a 60 km de la ciudad de Bogotá y cuenta con 21 713 habitantes, de los cuales 8 277 viven en la cabecera municipal (38,1 %) y 13 436 viven en la zona rural (61,9 %) (11). Tiene una cobertura de acueducto del 87 % y de alcantarillado del 47,4 % (12).

Con la colaboración de la Junta de Acción Comunal, se convocó la participación de 15 núcleos familiares, a quienes se les aplicó una encuesta para conocer sus hábitos con respecto al uso de los sanitarios y el tipo de abonos utilizados para los cultivos que manejan.

Se construyó un sanitario seco en una de las fincas y durante cinco meses se hizo seguimiento a las variables de temperatura, volumen y densidad del residuo para evaluar la evolución del proceso de compostaje. El producto

final fue caracterizado para verificar que cumpliera con los requerimientos mínimos para su uso como abono orgánico. Posteriormente se proyectó la cantidad agua ahorrada en un año y su impacto económico en las finanzas del municipio, si este adoptara la tecnología de sanitarios secos para el tratamiento de residuos humanos.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la encuesta se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados encuesta aplicada

| Variables   | Valor   |      |
|---|---|------|
| Número de familias encuestadas  | 15  |      |
| Promedio integrantes/familia  | 3,33  |      |
| Promedio de usos/día del sanitario  | 8,33  |      |
| Cultivos predominantes en el área (%)   | Mango   | 31,0 |
|   | Yuca  | 8,0  |
|   | Mandarina                                       | 28,0 |
|   | Aguacate  | 13,0 |
|   | Plátano   | 13,0 |
| Tipo de abonos utilizados (%)   | Otros   | 7,0  |
|   | Orgánicos (gallinaza, estiércol de cerdo, etc.) | 53,4 |
|   | Químicos  | 13,4 |
|   | Ninguno   | 33,2 |
| Aceptación del uso de heces humanas para la elaboración de abonos orgánicos (%) | Si  | 67,0 |
|   | No  | 33,0 |

Fuente: (10).

En la Tabla 3, se pueden apreciar los datos obtenidos en el material sometido al proceso de compostaje, durante el proceso.

**Tabla 3.** Datos registrados durante el proceso de compost

| Fecha       | Peso (kg) | Volumen de la muestra (m <sup>3</sup> ) | Temperatura (°C) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----------|---|------------------|-------------------------------|
| 04-nov-2012 | -         | -                                       | -                | -                             |
| 18-nov-2012 | 6,20      | 0,0177                                  | 24,00            | 350,85                        |
| 09-dic-2012 | 6,00      | 0,0177                                  | 53,00            | 339,53                        |
| 23-dic-2012 | 5,30      | 0,0177                                  | 62,00            | 299,92                        |
| 06-ene-2013 | 5,80      | 0,0177                                  | 68,00            | 328,21                        |
| 20-ene-2013 | 5,50      | 0,0177                                  | 56,00            | 311,24                        |
| 03-feb-2013 | 5,20      | 0,0177                                  | 45,00            | 294,26                        |
| 17-feb-2013 | 5,00      | 0,0177                                  | 38,00            | 282,94                        |
| 03-mar-2013 | 4,80      | 0,0177                                  | 29,00            | 271,62                        |
| 17-mar-2013 | 4,40      | 0,0177                                  | 25,00            | 248,99                        |
| Promedio    | 5,425     | 0,0177                                  |                  | 303,06                        |
| Acumulado   | 43,4      | 0,1593                                  |                  |                               |

Fuente: (10).

En la Tabla 4 se presenta la comparación de los costos de construcción y de operación de un sanitario seco con un sanitario convencional, teniendo en cuenta las condiciones de la zona de estudio.

**Tabla 4.** Comparación de costos de construcción y operación en las condiciones del municipio

| Variable               | Costos de construcción | Costos de operación (año) |
|------------------------|------------------------|---------------------------|
| Sanitario convencional | \$1 582 000            | \$162 200*                |
| Sanitario Seco         | \$1 183 500            | \$107 300**               |

\*Costos de potabilización y tratamiento de aguas residuales. \*\*Valoración del tiempo/persona e insumos requeridos para el manejo de los desechos Fuente: (10).

El compost obtenido en la operación del sanitario seco fue evaluado para verificar que cumpliera estándares mínimos para ser usado en los cultivos del área. Los datos se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Análisis de laboratorio del compost obtenido

| Parámetro    | Unidad | Resultado | Norma<br>(Farm Composting<br>Handbook) |
|--------------|--------|-----------|--|
| Relación C/N |        | 10,5 : 1  | 25 : 1 – 30 : 1                        |
| Humedad      | %      | 47        | 40 – 65                                |
| pH           |        | 7,59      | 5,5 – 9,0                              |
| Temperatura  | °C     | 68        | 55 - 75                                |

Fuente: (10).

En la Tabla 6, se calcula el ahorro en consumo anual de agua si toda la población del municipio implementara el uso de sanitarios secos.

**Tabla 6.** Cálculo del ahorro anual de consumo de agua en el municipio

| Año  | 2013                      |
|--|---------------------------|
| Población del municipio proyectada del censo de 2005     | 22 082 habitantes         |
| Promedio descargas/día/habitante                         | 2,25                      |
| Promedio volumen de agua en cada descarga                | 0,032 m <sup>3</sup>      |
| Gasto de agua/habitante/día                              | 0,072 m <sup>3</sup>      |
| Gasto anual de agua del municipio                        | 580 314,96 m <sup>3</sup> |
| Precio de venta de agua potable en el municipio          | \$1 063,17 m <sup>3</sup> |
| Valor anual ahorrado por el municipio en consumo de agua | \$616 973 456             |

Fuente: (10).

De acuerdo con los resultados obtenidos durante el estudio, se puede observar que:

- El grupo social con el que se trabajó mostró actitudes favorables hacia la posibilidad de utilizar las excretas como abono en sus cultivos, sin embargo, durante la etapa de acompañamiento mostró desconfianza sobre los procedimientos de manipulación de excrementos para su tratamiento.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en laboratorio, el compost obtenido cumple con los estándares para pH, temperatura, contenido de cenizas y humedad. El único parámetro por encima del valor mínimo exigido es la relación C/N, lo cual requeriría ajustes dentro del proceso para cumplir la norma.
- Los costos de construcción y operación del sanitario seco, representan un ahorro de 25 % y 33 % respectivamente, al compararlo con un sanitario convencional.
- La estimación del ahorro anual de agua para el municipio, si toda su población adoptara el uso del sanitario seco, sería de 580 314,96 m<sup>3</sup>, que representan \$616 973 456 (US\$ 308 487 aprox.).

## DISCUSIÓN

La tecnología del sanitario seco ofrece a nivel técnico y ambiental muchas ventajas sobre los sistemas convencionales de tratamiento de residuos humanos, tanto en términos de costos, como de impactos sobre el medio ambiente (2,4-6). Sin embargo, su uso no ha logrado masificarse de una manera relevante, que pueda modificar significativamente las condiciones de saneamiento básico en zonas rurales, debido a prejuicios y barreras de tipo social y cultural relacionadas con temores sobre la seguridad del sistema, por considerarla como una alternativa para población de bajos recursos y además requerir mayores actividades de mantenimiento por parte de los usuarios, entre otros (2). De manera análoga, otro tipo de comportamientos ambientalmente amigables como la separación de basuras, el reciclaje, el uso de la bicicleta o transporte público, cambiar las bolsas plásticas por bolsas reutilizables, etc., se enfrentan a valoraciones de tipo social que dificultan su adopción por parte de la mayoría de la población.

Estos desafíos requieren por parte de las autoridades y los tomadores de decisiones que se tengan en cuenta no solo las ventajas técnicas de las alternativas de solución a un problema de manejo de residuos sólidos, en este caso, sino la manera en que las comunidades los perciben. Es muy importante conocer los factores que influyen la toma de decisiones por parte de los hogares para adoptar tecnologías de conservación de recursos, por ejemplo: su ingreso, el nivel educativo, el tamaño de la familia, el precio de los recursos y de la tecnología, entre otros (8). Se debe tener en cuenta que toda política pública pasa por una decisión personal (9) y esto hace que sea necesario un trabajo adicional de pedagogía, socialización y seguimiento.



Las nuevas tecnologías y con mayor razón, las relacionadas con manejo de excretas, requieren experimentación y un marco de aplicación para manejar la complejidad e incertidumbre para su aceptación social. Se debe profundizar en aspectos como capacitación y acompañamiento teniendo en cuenta factores como: cosmovisión y valores de los grupos sociales, percepción del riesgo y hábitos. Se requieren tanto inversiones en el desarrollo de estructuras físicas, como en el fortalecimiento de estructuras sociales (13). Se ha encontrado que grupos sociales con igual nivel socioeconómico, tienen diferentes percepciones sobre el manejo de desechos humanos (14) y la información limitada sobre riesgos y procedimientos hacen que prácticas y tecnologías con buen desempeño técnico no logren volverse hábitos en las comunidades.

Como herramientas de trabajo para lograr cambios relevantes en términos de adopción de tecnología y prácticas ambientalmente amigables, se han propuesto realizar análisis etnográficos que permitan entender la manera en las personas hacen las cosas, educar, desarrollar habilidades, motivar el uso continuado del comportamiento y generar nuevo conocimiento (15), se requiere un modelo flexible que evalúe las diferentes etapas y fases adaptándose a la respuesta de la comunidad y no de manera lineal (16).

Se requiere proponer un diálogo cultural que haga énfasis en las personas y no en las cosas o procedimientos (17) y desarrollar alternativas que mejoren la interacción tecnología-usuario (18,19) ♦

## REFERENCIAS

1. Departamento Nacional de Estadística DANE. Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2013. [Internet]. Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/es/estadisticas-sociales/calidad-de-vida-ecv/87-sociales/calidad-de-vida/5399-encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-2013>. Consultado mayo de 2014.
2. Devkota J, Schlachter H, Anand C, Phillips R, Defne A. Development and application of EEAST: A life cycle based model for use of harvested rainwater and composting toilets in buildings. *Journal of Environmental Management*. 2013; 130: 397-404.
3. Chirjiv A, Defne A. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation – A review. *Waste Management*. 2014; 34: 329-343.
4. Anand C, Defne A. Economic and environmental analysis of standard, high efficiency, rainwater flushed, and composting toilets. *Journal of Environmental Management*. 2011; 92: 419-428.
5. Mnkeni P, Austin L. Fertiliser value of human manure from pilot urine-diversion toilets. *Water SA*. 2009; 35(1): 133-138.
6. Dienera S, Semiyagab S, Niwagabab C, Murray A, Gningid J, Mbéguéré M, et al. A value proposition: Resource recovery from faecal sludge: Can it be the driver for improved sanitation? *Resources, Conservation and Recycling*. 2014; 88: 32-38.

7. Caidedo N, Cruz M. Implementación del Programa de sanitarios ecológicos como estrategia para disminuir enfermedades en el corregimiento de Caimalito del municipio de Pereira. Tesis de grado Administración Ambiental [2012]. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
8. Dupont D, Renzetti S. Household behaviour related to water conservation. *Water Resources and Economics*. 2013; 4: 22-37.
9. Wallina A, Zannakisb M, Johanssonc L, Molandera S. Influence of interventions and internal motivation on Swedish homeowners' change of on-site sewage systems. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013; 76: 27-40.
10. Niño J, Bermúdez, J. Implementación de sanitario seco para la obtención de compost orgánico en la vereda San Miguel de Mesitas del Colegio (Cundinamarca). Tesis de grado Ingeniería Civil [2013]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
11. Ministerio de Salud y Protección social. Sistema Integral de la Protección Social SISPRO, Ficha departamental y municipal. [Internet]. Disponible en: <http://www.sispro.gov.co/#>. Consultado mayo de 2014.
12. Departamento Nacional de Planeación DNP, Información municipal para la construcción de programas de gobierno. [Internet]. Disponible en: <https://pwh.dnp.gov.co/Programas/DesarrolloTerritorial/Gesti%C3%B3nP%C3%BAblicaTerritorial/Gu%C3%ADasMetodolog%C3%ADasyPublicaciones.aspx>. Consultado mayo de 2014.
13. Montes A. Análisis de la contribución de los sanitarios secos al Saneamiento básico rural. Caso: vereda chorrillos. Tesis de grado Maestría en Gestión Ambiental [2009]. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
14. Lamichhane K, Babcock R. Survey of attitudes and perceptions of urine-diverting toilets and human waste recycling in Hawaii. *Science of the Total Environment*. 2013; 443: 749-756.
15. Ramani S, Sadre-Ghazi S, Duysters G. On the diffusion of toilets as bottom of the pyramid innovation: Lessons from sanitation entrepreneurs. *Technological Forecasting & Social Change*. 2012; 79: 676-687.
16. Davies-Colley C, Smith W. Implementing environmental technologies in development situations: The example of ecological toilets. *Technology in Society*. 2012; 34: 1-8.
17. Eva P. La pertinencia cultural en los procesos de transferencia tecnológica: el caso de las unidades sanitarias secas en la región de Aysen, Chile. Tesis de grado Magister en Desarrollo Rural [2006]. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
18. Guerrero M, Fritche J, Martínez R, Hernández Y. Diseño y construcción de sanitarios ecológicos secos en áreas rurales. *Revista Cubana de Salud Pública* 2006; 32(3). [Internet] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21420864016>. Consultado mayo de 2014.
19. Del Olmo A. Sanitario mecatrónico para un sistema ecológico. Tesis de grado para Ingeniero Mecatrónico [2011]. Universidad Autónoma de México, México D.F.