



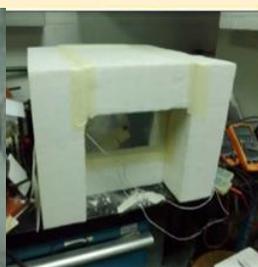
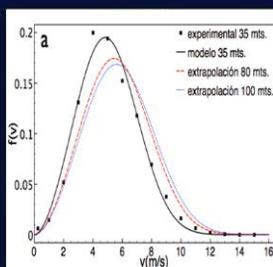
ISSN:1665-529X

Vol. 19 Núm. 2

Mayo – Agosto 2015

# Ingeniería

Revista Académica de la Facultad de Ingeniería



Universidad Autónoma de Yucatán

Mérida, Yucatán, México



# Directorio

## Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. José de Jesús Williams  
Rector  
Mtro. José Luis Villamil Urzaiz  
Secretario General  
Dr. Carlos Alberto Estrada Pinto  
Director General de Desarrollo Académico  
Dr. David Torres Mejía  
Coordinador General de Comunicación Institucional

## Facultad de Ingeniería

Dr. José H. Loría Arcila  
Director  
Dr. José A. Méndez Gamboa  
Secretario Académico  
Ing. Jorge A. Vivas Pereira  
Secretario Administrativo  
Dr. Luis E. Fernández Baqueiro  
Jefe de la Unidad de Posgrado e Investigación

## Consejo Editorial

Dra. María del Carmen Ponce Caballero. Universidad Autónoma de Yucatán  
Directora-Editora

Dra. Milenis Acosta Díaz	Universidad Autónoma de Yucatán. México
Dr. Luis F. Alarcón Cárdenas	Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile
Dr. Gabriel Auvinet Guichard	Universidad Nacional Autónoma de México. México
Dr. Alejandro Arturo Castillo Atoche	Universidad Autónoma de Yucatán, México.
Dra. Ildi Cismaşiu	Universidade Nova de Lisboa. Portugal
Dr. Raymundo Dávalos Sotelo	Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, México
Dr. Alejandro R. Femat Flores	IPICYT, San Luis Potosí. México
Dra. Georgina Fernández Villagómez	Universidad Nacional Autónoma de México. México
Dr. Oscar M. González Cuevas	Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México
Dr. Pedro Herrera Franco	Centro de Investigación Científica de Yucatán. México
Dr. Vítor M. A. Leitão	Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal
Dr. Eric Iván Moreno	Universidad Autónoma de Yucatán
Dr. Andrés I. Oliva Arias	CINVESTAV, Unidad Mérida. México
Dra. Julia Pacheco Avila	Universidad Autónoma de Yucatán
Dr. Héctor M. Poggi Varaldo	CINVESTAV, Unidad Zacatenco. México
Dr. Guillermo F. Salazar Ledezma	Worcester Polytechnic Institute. EUA
M. en Ing. Rómel G. Solís Carcaño	Universidad Autónoma de Yucatán. México
Dr. Edward I. Stentiford	Leeds University. Inglaterra
Dr. Jorge Varela Rivera	Universidad Autónoma de Yucatán. México

M. en C. Roger Hervé Pech Sánchez. Universidad Autónoma de Yucatán  
Coordinador editorial

# Ingeniería

Revista Académica de la Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Yucatán

## Contenido

<b>Editorial</b>		iv
<b>Artículos de Investigación</b>	<b>Predicción de velocidades y potencial eólico para alturas superiores: estudio en Mérida, Yucatán, México</b>	<b>85</b>
	<i>Carvente Muñoz, O., Borges Pool, A., Palmero Bojórquez, M., González Carrillo, B. Ordóñez López E.I, Pérez Cortés, M.I, Valdivieso Sogbi, H.</i>	
	<i>Correo electrónico: osvaldo.carvente@uady.mx</i>	
	<b>Evaluación de las propiedades físico mecánicas de ladrillos de arcilla recocida, elaborados con incorporación de residuos agrícolas, caso Chiapas, México</b>	<b>91</b>
	<i>Eddy González García, Liliana Lizárraga Mendiola</i>	
	<i>Correo electrónico: ing_egonzalez@hotmail.com</i>	
	<b>Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán</b>	<b>102</b>
	<i>Mena-Novelo W. D., Un-Aragón R.A., Corona J.E., Romero M., Oliva A.I</i>	
	<i>Correo electrónico: oliva@mda.cinvestav.mx</i>	
	<b>Evaluación de la toxicidad puntual en un sitio de disposición final de residuos municipales</b>	<b>110</b>
	<i>Sosa-Olivier José Aurelio, Laines-Canepa José Ramón, Enríquez-Murguía Jorge Francisco, Molina Fernando, Bautista-Martínez Liliana, Segura-García Andrea Eduviges, Hernández-Alcudia Sheyla Esthefany</i>	
	<i>Correo electrónico: ing-jaso@hotmail.es</i>	
	<b>Mejora del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos empleando herramientas SIG: un caso de estudio</b>	<b>118</b>
	<i>Juan Antonio Araiza Aguilar, Miguel Eduardo José Zambrano</i>	
	<i>Correo electrónico: araiza0010@hotmail.com</i>	
<b>Artículo de Divulgación</b>	<b>La importancia del control de la contaminación por ruido en las ciudades</b>	<b>129</b>
	<i>Martha G. Orozco Medina, Alice Elizabeth González</i>	
	<i>Correo electrónico: mgeorozco@gmail.com.mx</i>	
<b>Guía de autores</b>		
<b>Authors' guide</b>		

# Predicción de velocidades y potencial eólico para alturas superiores: estudio en Mérida, Yucatán, México

Carvente Muñoz, O.<sup>1</sup>, Borges Pool, A.<sup>2</sup>, Palmero Bojórquez, M.<sup>2</sup>, González Carrillo, B.<sup>2</sup> Ordóñez López E.<sup>1</sup>, Pérez Cortés, M.<sup>1</sup>, Valdivieso Sogbi, H.<sup>2</sup>

*Fecha de recepción: agosto 2014 – Fecha de aprobación: marzo 2015*

## RESUMEN

Estimar experimentalmente el potencial eólico para alturas superiores a 30 metros requiere, en general, de un costo significativo en infraestructura. Basados en mediciones experimentales de la velocidad del viento a una altura de referencia  $z_0 = 35$  metros, y usando la ley de Hellman, en este trabajo reportamos los resultados de la velocidad del viento extrapolada para alturas mayores a  $z_0$ . Las distribuciones de probabilidad de velocidades, experimental para  $z_0$ , y las correspondientes a las alturas de extrapolación  $z = 80, 100$  metros, son obtenidas por medio de la distribución de Weibull. Utilizando el software mathematica se obtienen los valores de los parámetros de escala  $c$ , y de forma  $k$ , que mejor ajustan la función de distribución de probabilidad de Weibull (PW) a los datos experimentales y a las curvas de extrapolación. Finalmente, con los valores obtenidos de los parámetros  $c$  y  $k$ , se presentan los resultados del potencial eólico disponible a la altura de referencia y a las alturas de extrapolación. Las velocidades de viento usadas en éste trabajo fueron medias en los campos deportivos del Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad Autónoma de Yucatán. Los resultados muestran la factibilidad para instalar aero-generadores en el citado campus.

**Palabras Clave:** Weibull, distribución, extrapolación, potencial, viento.

## Predicting wind speeds and potential for greater heights: study in Merida, Yucatan, Mexico

### ABSTRACT

In order to obtain velocity distributions for heights greater than 35 m is necessary an expensive infrastructure. Based on experimental measurements of wind speeds at reference height ( $z_0 = 35m$ ) above the ground level, the wind velocities for greater heights are extrapolated by means of the so called Hellman Law. The experimental probability distribution function at  $z_0$ , and their corresponding to the extrapolation heights,  $z = 80, 100m$  are also reported. Using mathematica software we find the best fits of the two parameters Weibull distribution to our experimental probability distributions and to the extrapolation curves, hence, the scale  $c$  and the shape  $k$  parameters, are also reported for the greater heights. Finally, the available wind power energy for Merida location, predicted by Weibull distribution, is calculated. The measurements used in this study where takes in the sport fields of the campus of exact sciences of the Autonomous University of Yucatan, the results show the feasibility of implementing wind turbines.

**Key words:** Weibull, distribution, extrapolation, potential, wind.

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, UADY. Av. Industrias no contaminantes por periférico norte S/N C.P.97310, Mérida Yucatán México. Correo electrónico: osvaldo.carvente@uady.mx

<sup>2</sup> Egresado del programa de Maestría en Ingeniería, Opción Energías Renovables, Facultad de Ingeniería, UADY. Av. Industrias no contaminantes por periférico norte S/N C.P.97310, Mérida Yucatán México.

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

**INTRODUCCIÓN**

El precio de nuestro estilo de vida no podría ser más costoso, gracias a las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, producto de prácticamente todas nuestras actividades, la temperatura de la superficie de nuestro planeta aumenta cada vez más y de manera alarmante (Mora et al. 2013). Si bien el panorama es perturbador, lo cierto es que se requiere voluntad global para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y en su caso revertir el calentamiento global.

Los avances científicos y tecnológicos actuales permiten obtener energía eléctrica, sin emisiones del principal gas de efecto invernadero, el  $CO_2$ , a partir de fuentes renovables limpias como la eólica y la solar. No hay duda de que la economía de México depende en gran medida de la exportación de petróleo, lo cual es un factor determinante en el tipo de política pública que se diseña para el desarrollo de nuestro país, sin embargo también hay que mencionar que hay interés en obtener electricidad a partir de fuentes renovables. De acuerdo con Global Wind, México en 2012 tenía una capacidad de 1,370 MW de capacidad instalada, situándolo dentro de la lista de 24 países con más de 1,000 MW de capacidad de transformación de energía eólica a eléctrica (Fried 2012). No obstante, la energía que se consume en México se debe en primer lugar a la industria termoeléctrica (71 %), la cual usa petróleo como principal fuente de energía, después la hidroeléctrica (18 %), siguiendo el carbón como fuente de energía (5 %), después las fuentes renovables, como la fotovoltaica y eólica (4 %), y finalmente la nuclear (2 %) (SENER 2013).

Como una muestra de responsabilidad social, desde 2010 la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIAUDY) cuenta con 20 kW de instalación en celdas solares y 10 kW en aero-generadores situados a 40 metros de altura. Gracias a la instalación de techos verdes y la implementación de aires acondicionados más eficientes, el costo anual energético se ha reducido en 23 %. La ubicación geográfica de la Península de Yucatán representa una ventaja en cuanto a litoral costero, sin duda la energía eólica será, en un futuro, un motor de desarrollo económico. Conocer la distribución del viento y del potencial eólico permitirá tomar la mejor decisión en cuanto al tipo de turbinas que deberán implementarse. La aportación principal de este trabajo son los resultados del potencial del viento para alturas a las cuales, desde el punto de vista económico, es muy costoso acceder. A continuación presentamos un resumen de la metodología matemática que requiere el tema de estudio, seguiremos después con la

sección de resultados y discusión y finalizaremos con las conclusiones.

**Antecedentes**

En esta sección se resume la Ley de Hellman, la cual es ampliamente utilizada para extrapolar la velocidad del viento para alturas superiores a la altura de referencia, además, se proporcionan las herramientas necesarias para realizar un análisis estadístico completo de la distribución de velocidades de viento y el cálculo del potencial eólico (Johnson 2001, Manwell *et al.*, 2010, Mathias y Ulrich 2006, Erichand y Renouard 2005).

**i. La ley de Hellman.**

Investigadores y desarrolladores de turbinas eólicas, con frecuencia, se ven forzados a extrapolar datos de velocidades de viento (medidos experimentalmente a alturas menores de 35 metros), para tener una idea de la distribución de velocidades a alturas donde no se cuenta con torres de monitoreo (Schwartz M.) El método principal de extrapolación, y quizás el más ampliamente usado se debe a Hellman, también conocido la ley de potencias  $1/7$ , el método requiere del conocimiento previo de las velocidades a una altura conocida (usualmente 10 metros por encima del nivel medio del mar), y un exponente de viento cortante,  $\alpha$ , que gobierna la cantidad de masa de aire que sufre un esfuerzo cortante entre la altura de referencia y la altura a la que se desea extrapolar (Petersen 1998).

En la mayoría de situaciones prácticas, el exponente de corte  $\alpha$  toma el valor de  $1/7$ , el cual corresponde a condiciones atmosféricas neutras, más adelante nosotros consideraremos condiciones de atmósfera neutra para evaluar el potencial eólico. La ley de Hellman está dada por :

$$v(z) = v_0(z_0) \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \tag{1}$$

Donde  $z_0$  es la altura de referencia,  $v(z_0)$  es la velocidad medida a la altura de referencia, y  $v(z)$  es la velocidad extrapolada a la altura superior  $z > z_0$ . En la literatura el coeficiente de corte  $\alpha$  toma valores entre 0.14 (como en nuestro caso) y 0.2. Sin embargo, en situaciones reales  $\alpha$  no es constante, depende de factores climáticos, temperatura, presión, humedad, hora del día, estación del año, dirección del viento y la naturaleza del terreno (Patel 1999, Elkinton 2006, Kirchoff 1983, Turner 2008). En la Tabla 1 se resumen los valores para el coeficiente de corte de viento asociado con diferentes tipos de geografía y topografía.

**Tabla 1.** Coeficiente de corte de viento para diferentes tipos de terreno

Tipo de terreno	coeficiente de corte de viento $\alpha$
Océanos, lagos y superficies suaves	0.1
Maleza de hasta 35 centímetros de alto	0.15
Cultivos altos, setos y arbustos	0.2
Región arbolada	0.25
Ciudad pequeña con arbustos y pequeños árboles	0.3
Ciudad con edificios altos	0.4

**ii. Distribución de Weibull.**

Cuando se realizan mediciones de la velocidad del viento en intervalos de por lo menos 1 año, la función de distribución de probabilidad de Weibull se usa con éxito para describir las curvas de frecuencia (Odo 2012, Ahmed 2012, Ali 2004). La distribución de Weibull es de 2 parámetros, y es un caso especial de la función de distribución gama generalizada. Las velocidades del viento  $v > 0$  están distribuidas según la distribución de Weibull si su función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{2}$$

Donde  $c > 0$  y  $k > 0$  son los parámetros de escala y forma, respectivamente. La ecuación (2) proporciona la probabilidad de que la velocidad del viento se encuentre dentro del intervalo de ancho 1 m/s y centrado en  $v$ . La ecuación (2) ha sido aplicada con éxito en muchas localidades alrededor del mundo cuando el periodo de tiempo de medición de las velocidades es por lo menos de 6 meses. Desde el punto de vista práctico, es deseable conocer la probabilidad de medir una velocidad cuyo valor sea menor o igual a  $v$ , para ello se requiere la función acumulativa de Weibull  $F(v)$ , la cual está dada por:

$$F(v) = \int_0^v f(x) dx \tag{3}$$

Usando la ecuación (2), con la substitución  $x \rightarrow v$ , un cálculo directo muestra que la ecuación (3) toma la siguiente forma:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{4}$$

La función acumulativa de Weibull tiene las propiedades  $F(0) = 0$  y  $F(\infty) = 1$ . Es importante remarcar que en la práctica la cantidad  $F(0)$  no es necesariamente cero ya que existen casos donde efectivamente se mide velocidad del viento igual a cero. Para determinar el potencial es necesario conocer el valor de la velocidad promedio, usando la ecuación (2), se tiene que:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \tag{5}$$

La ecuación (5) tiene la forma de la función matemática gama. Un cálculo directo muestra que la velocidad promedio está dada por:

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \tag{6}$$

**iii. La potencia promedio en el viento.**

Cuando se modelan los datos de viento por medio de la función de densidad de probabilidad  $f(v)$ , la potencia promedio del viento  $P_w$ , que pasa en dirección perpendicular a un área  $A$  está dada por:

$$P_w = \frac{1}{2} A \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \tag{7}$$

Donde  $\rho$  es la densidad promedio del aire. Es claro que la potencia en el viento para alguna velocidad particular  $v$  es simplemente  $A \rho v^3 / 2$ . Es posible mostrar (Justus 1978) que cuando  $f(v)$  es la función de distribución de Weibull (como en nuestro caso), la potencia promedio que entrega el viento está dada por:

$$P_w = \frac{A \rho \bar{v}^3 \Gamma(1 + 3/k)}{2[\Gamma(1 + 1/k)]^3} \tag{8}$$

La ecuación (8) representa la potencia promedio por unidad de tiempo que una masa de aire con velocidad  $v_i$  suministra sobre un área perpendicular  $A$ . Para fines de instalación de aero-generadores es necesario conocer la potencia del viento predicha por la distribución de Weibull a lo largo de, por ejemplo, un año (ver ecuación (9)).

$$W_{v_i} = \frac{1}{2} A \rho v_i^3 f(v_i) (8760) \tag{9}$$

**RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS**

A continuación reportamos los resultados del análisis estadístico de las mediciones de la velocidad del viento correspondientes a la segunda mitad del año 2012 y a la primera mitad de 2013. Las mediciones fueron tomadas en los campos deportivos del Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías de la UADY, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México (21°2'57"). Un anemómetro NRG (<http://www.nrgsystems.com>), montado sobre el brazo de una torre reticulada a 39 metros de

altura sobre el nivel medio del mar, colectaba datos de velocidad de viento y los transmitía por radio frecuencia (en la banda ISM de 2.4 GHz) a una computadora para su almacenamiento. Finalmente, los datos que usamos en este estudio son promedios sobre intervalos de 10 segundos.

Con el propósito de hallar la probabilidad de obtener cierto valor de velocidad, para velocidades pequeñas, se realizó un primer conteo para encontrar la frecuencia de las velocidades en el intervalo entre 0 y 0.5 m/s, centrado en 0.25 m/s. Subsecuentes conteos dentro de intervalos de 1 m/s de ancho y centrados en 1, 2, 3, ... m/s, de ésta manera se obtienen los puntos experimentales de probabilidades para cada valor de velocidad (ver figura 1.a, cuadros negros). La interpretación de los puntos es la siguiente: si deseamos medir la velocidad del viento a una altura de 39 metros, tenemos aproximadamente el 20% de probabilidad de medir 4 m/s (valor de la velocidad más probable), cerca de 18% de medir 5 m/s, y así sucesivamente. Por otra parte, la probabilidad de medir velocidades mayores a 11 m/s es mucho prácticamente cero. Por supuesto, lo anterior puede ser diferente en caso de un huracán o una tormenta tropical, pero en tales casos, el exceso de energía del viento pudiera dañar las turbinas, por lo cual deben contar con sistemas de frenado y dejar de operar en condiciones por encima de su operación normal.

Para evaluar el potencial eólico es necesario conocer los valores de los parámetros  $c$  y  $k$  de la distribución de Weibull (ver ecuación 2), para ello implementamos el método del gradiente de conjugado del software mathematica, con lo cual se encuentra el mejor ajuste a nuestro datos

experimentales. La línea sólida de la figura 1 (a) muestra el mejor ajuste de la ecuación (2) a nuestros datos experimentales (cuadros sólidos).

Las curvas punteadas corresponden a los resultados de aplicar el gradiente conjugado a los datos de las velocidades extrapoladas (80 y 100 metros). Los valores de los parámetros  $c$  y  $k$  resultantes se muestran en la tabla 2. Si uno requiere saber la probabilidad de medir una velocidad de viento, por ejemplo entre 2 y 5 m/s, es necesario conocer la distribución acumulada. Dicha distribución se obtiene al introducir los valores de  $c$  y  $k$  a la ecuación (4), tanto a nuestros datos experimentales, ver cuadros sólidos de la figura 2 (b), como a los datos de las curvas extrapoladas, ver curvas punteadas de la figura 2 (b). Los resultados de las velocidades promedio dadas por la ecuación (6) y la potencia promedio dada por la ecuación (8) se muestran en la tabla 2. Finalmente, para condiciones climáticas estándar, donde la densidad del aire toma el valor de 101.325 kPa, calculamos el potencial anual del viento incidente de manera perpendicular sobre un área de 1m<sup>2</sup> predicho por la distribución de Weibull (ecuación (9)). Los resultados se muestran en la figura 2.

Tabla 2. Resumen de resultados.

height $m$	$c$	$k$	$\bar{v}$ $m/s$	$\bar{P}_w$ (W)
$z_0 = 35$	5.671	2.796	5.049	60.876
$z = 80$	6.367	2.800	5.670	86.202
$z = 100$	6.576	2.801	5.856	94.965

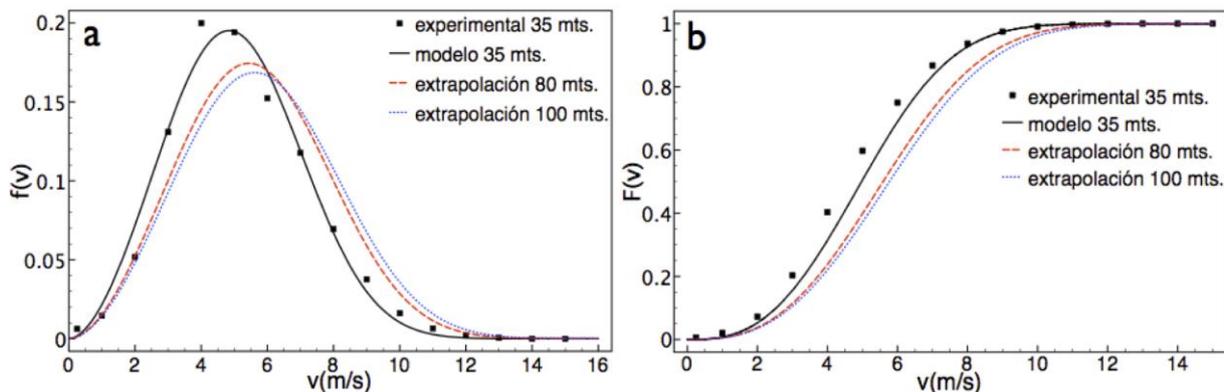
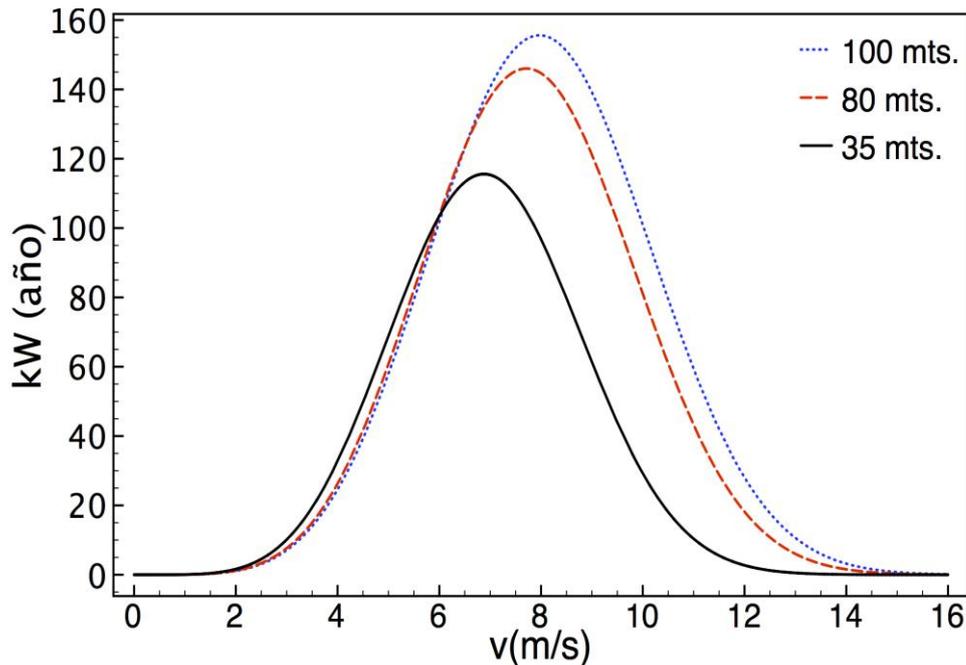


Figura 1. (a) Gráfica de la distribución de velocidades de viento. Los cuadros sólidos son los resultados Para los datos experimentales, la curva sólida es el mejor ajuste de la ecuación (2). Las curvas punteadas corresponden a los datos de extrapolación usando la ecuación (1). Se observa que a medida que aumenta la altura la velocidad más probable también aumenta. (b) Distribución acumulativa de las velocidades de viento correspondientes a los datos de las curvas de (a).



**Figura 2.** El potencial eólico anual predicho por la distribución de Weibull en términos de los valores de la velocidad del viento. La curva sólida es para la altura de 35 metros, mientras que las punteadas corresponden a las velocidades extrapoladas. Se observa que al ir de 35 a 100 metros se obtendría cerca de un 50% más de potencia.

Los resultados obtenidos muestran que existe una diferencia de aproximadamente 1 m/s entre la velocidad promedio a 35 metros y 100 metros de altura (ver tabla 2), sin embargo esa diferencia es suficientemente significativa para que la potencia promedio aumente en casi 50% (ver tabla 2). Estudios anteriores obtienen una velocidad promedio de 6.5 m/s en la franja costera del litoral de Yucatán (Soler 2009). En cuanto a las potencias máximas anuales, también se observa una diferencia de cerca del 50% entre 35 y 100 metros (ver figura 2). Sin duda es un incremento significativo, sin embargo es conveniente un estudio económico más profundo que permita determinar la viabilidad para colocar turbinas a 100 metros de altura, sin embargo tal estudio está fuera del alcance de éste trabajo.

#### CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la metodología matemática para caracterizar el recurso eólico.

**AGRADECIMIENTOS:** Los autores agradecen el apoyo financiero de Conacty y del gobierno del estado de Yucatán, dentro del proyecto FOMIX 108931.

#### REFERENCIAS

Ahmed S. A. y Mohammed H. O. (2012). A Statistical analysis of Wind Power Density Based on Weibull and Raleigh Models of Penjuen Region Sulaimani, Iraq. "Journal of Mech. And Industrial Engineering". Vol. 6.

Ali N. C. (2004). A Statistical analysis of Wind Power Density Based on Weibull and Raleigh Models at the Southern Region of Turkey. "Renewable Energy". Vol. 24.

- Elkinton M. R., Rogers A. L. y McGowan (2006). An investigation of wind-shear models and experimental data trends for different terrains. "Wind Energy", Vol. 40.
- Erichand H., y Renouard H. (2005): Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Applications, Economics. Alemania. Ed. Springer.
- Fried S. S., Sawyer S., Qiao L., Global Wind Report 2012. URL: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/>.
- Johnson G. L. (2001): Wind Energy Systems, Manhattan KS. Ed. Prentice Hall.
- Justus C. G. (1978). Winds and wind system performance. Estados Unidos. Ed. Franklin Insitute Press.
- Kichoff R. H. y Kaminsky F. C. (1983). Wind shear measurements and synoptic weather categories for siting large wind turbines. "Journal of Wind Enginnering and Industrial Aerodynamics". Vol 15.
- Manwell J. F., McGowan J. G., y Rogers A. L. (2010): Wind Energy Explained: Theory, Design and Aplications, 2da Edición. Estados Unidos. Ed. Wiley.
- Matthias L., y Ulrich F. (2005): Phisycal Approach To Short-Term Wind Power Prediction, Alemania. Ed. Springer.
- Mora C., Frazier A. G., Longman R. J., Dacks R. S., Walton M. M., Tong E. J., Sanchez J. J., Kaiser, L. R., Stender Y. O., Anderson J. M., Ambrosino C. M., Fernandez I., Giuseffi L. M., y Giambelluca T. W. (2013). The projected timing of climate departure form recent variability. "Nature" Vol. 502.
- Odo F. C., Uffiah S. U. y Ugwoke P. E. (2012). Weibull distribution-based model for prediction wind potential en Enugu, Nigeria. "Adv. In Appl. Science Research". Vol 3.
- Patel M. R. (1999), Wind and Solar Power Systems, Estados Unidos. Ed. CRC Press.
- Petersen E. L. et al. (1998). Wind power meteorology, "Wind Energy", Vol. 1.
- SENER, [www.renovables.gob.mx](http://www.renovables.gob.mx), On line, 2013. URL: <http://www.renovables.gob.mx>.
- Soler B. R. y Infield D. (2009). Preliminary study of long-term wind characteristic of the Mexican Yucatan Peninsula. "Energy Conversion and Management". Vol. 50.
- Turner B. y Istchenko R. (2008). Extrapolation of wind profiles using direct measures of stability. "Wind Engineering". Vol. 32.

---

Este documento debe citarse como: Carvente Muñoz, O., Borges Pool, A., Palmero Bojórquez, M., González Carrillo, B. Ordóñez López E., Pérez Cortés, M., Valdivieso Sogbi, H. (2015). **Predicción de velocidades y potencial eólico para alturas superiores: estudio en Mérida, Yucatán, México.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 85-90, ISSN 1665-529-X.

# Evaluación de las propiedades físico mecánicas de ladrillos de arcilla recocida, elaborados con incorporación de residuos agrícolas, caso Chiapas, México

Eddy González García<sup>1</sup>, Liliana Lizárraga Mendiola<sup>2</sup>

*Fecha de recepción: febrero de 2015 – Fecha de aprobación: mayo 2015*

## RESUMEN

Una alternativa de solución a la contaminación por la disposición final de los residuos agrícolas, es la de incorporarlos a la fabricación de materiales de construcción. El tipo de residuo generado dependerá de cada región o país, por lo tanto siguiendo esa tendencia, este artículo presenta los resultados del análisis realizado a los ladrillos de cerámica roja fabricados en la Ribera de Cupía, del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México, con la adición de residuos agrícolas como el cascabillo de café, la cáscara de coco y el olote de maíz, cuyas producciones son abundantes en esta entidad. Las proporciones utilizadas en la mezcla con la arcilla son las siguientes: 0%, 4%, 8% y 12% en peso, a temperaturas de cocción de 800°C, 900°C, y 1,000°C, en un horno tipo industrial. Las características evaluadas son: Resistencia a la compresión y absorción comparándolas con los parámetros establecidos en la normatividad nacional para ladrillos estructurales y no estructurales. Los resultados indican que para la resistencia a la compresión y de absorción de un ladrillo estructural, es necesario elevar la temperatura de cocción alrededor de 1,000°C. En cambio para el ladrillo no estructural, es suficiente elevar la temperatura a 900°C; este último permite la adición de hasta 4% en peso de cascabillo de café, y olote de maíz, con excepción de la cascara de coco que no cumple con los requerimientos mínimos de absorción.

**Palabras clave:** arcilla, cerámica, ladrillo, residuos agrícolas.

## Evaluation of physical and mechanical properties of annealed clay bricks made with incorporation of agricultural residues, in Chiapas, Mexico

### ABSTRACT

An alternative solution to pollution from the disposal of agricultural residues is their incorporation in the manufacture of building materials. The type of waste generated will depend of each region or country, so following that trend, this paper presents the results of the analysis performed on red ceramic bricks, manufactured in the Ribera de Cupía, municipality of Chiapa de Corzo, Chiapas, Mexico, with the addition of biomass waste as coffee husk, coconut husk and corn cob, whose productions are abundant in Chiapas. The proportions used in the mix with clay are as follows: 0%, 4%, 8% and 12% by weight at of 800°C, 900°C, and 1,000°C, in an industrial kiln. The characteristics evaluated are the compressive strength and absorption compared with the parameters established in national regulations for structural and non-structural bricks. The results indicate that for compressive strength of a structural clay brick used in this work, it is necessary to raise the temperature of around 1,000°C. In contrast to the non-structural brick, it is sufficient to raise the temperature up to 900°C; the latter allows the addition of coffee husks, coconut husk and corn cobs up to 4% by weight. This also meets the requirements in national regulations for the rate of absorption.

**Keywords:** Clay, ceramic, brick, agricultural wastes.

---

<sup>1</sup> Estudiante del Programa de Doctorado Interinstitucional en Ingeniería Civil en el Consorcio de Universidades Mexicanas (DIIC-CUMex), Universidad Autónoma de Chiapas. Correo electrónico: ing\_egonzalez@hotmail.com

<sup>2</sup> Profesora investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ingeniería. Correo electrónico. lililga.lm@gmail.com.

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería– Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

## **INTRODUCCIÓN**

Las grandes cantidades de residuos producto del proceso de la agricultura, representan un problema de contaminación, puesto que éstos son incinerados en su mayoría en el mismo lugar donde se generan. La reutilización de estos residuos al ser incorporados en la fabricación de materiales de construcción parece ser la solución más sustentable posible (Raut et al. 2011). La cantidad y disponibilidad de los residuos agrícolas, dependerá de cada región, un ejemplo claro es el estudio realizado por Madurwar et al. (2013), quienes determinan que la acumulación de residuos agrícolas se convierte en un problema de contaminación. Sin embargo, consideran como una alternativa de solución el agregar estos residuos al proceso de producción del ladrillo. Es importante señalar que la resistencia a la compresión de los ladrillos, así como su porcentaje de absorción depende directamente del tipo de arcilla, así como de la temperatura de cocción a la que ésta fue expuesta (Santos et al. 2011). Es decir, de acuerdo con los datos anteriores, a mayor índice plástico y menor contenido de arena, los resultados serán más favorables, independientemente de los residuos orgánicos que se agreguen a la mezcla (Afanador et al. 2013). En ese sentido, Demir (2008) evaluó el efecto de la adición de residuos orgánicos a la mezcla durante la producción de ladrillos, a través de las propiedades físicas y mecánicas. Para ello, utilizó residuos de tabaco, aserrín y pasto en proporciones de hasta 10% en peso. La temperatura de cocción fue de 900°C durante 60 minutos en un horno eléctrico y los resultados de la resistencia a la compresión alcanzan hasta 9.85 MPa.

Por otro lado, Chiang et al. (2009) analizaron ladrillos fabricados con arcilla extraída de lodos residuales y cenizas de la cascarilla de arroz, en proporción de hasta 20% en peso y una temperatura de cocción de 900 a 1,100°C, manteniéndolo durante 180 minutos. Los resultados que superaron los parámetros especificados en los códigos de requerimientos para ladrillos, fueron aquellos en donde se utilizaron menos del 15 % de cenizas de cáscara de arroz y temperaturas arriba de los 1,000°C. Martínez et al. (2012) realizaron pruebas en ladrillos cuya mezcla incluía bagazo de caña residuo de la industria cervecera. Los especímenes se prepararon con las cenizas del residuo antes mencionado agregando el 2.5, 5.0, 7.5, y 10% en peso; cabe señalar que la arcilla fue finamente molida y también llevó un proceso de prensado a 54.5 MPa, aun que no se informa sobre la caracterización física de la arcilla que indique la granulometría y su índice plástico. La temperatura de cocción fue de 950°C durante una hora. Los resultados de la prueba de compresión

confirman que todos los especímenes superaron los 10 MPa. En el trabajo realizado por Barbieri et al. (2013) se emplearon residuos tales como las cenizas de las semillas de uva, aserrín, semillas de cereza y de caña de azúcar. Se adicionaron 5 y 8% de residuos en peso, generando así diferentes muestras, siendo la M0 el espécimen de referencia sin adición de residuos; M1 aserrín en 5%; M2 semilla de uva en 5%; M3 semilla de cereza en 5%; M4 semilla de uva al 8%; M5 semilla de cereza al 8% y M6 caña de azúcar al 5%. Las muestras se prensaron de manera uniaxial a 25 MPa y se cocieron en un horno eléctrico a temperaturas de 950°C y 1,000°C, durante 172 min. Las pruebas del módulo de la rotura que se obtuvieron, demostraron que las cenizas del residuo de caña obtuvieron 28MPa a 1,000°C. Al igual que en los ejemplos anteriores, el hecho de utilizar residuos orgánicos, tiene ventajas tales como la reducción del volumen de arcilla, la reutilización de residuos de bajo costo y el aprovechamiento del poder energético de éstos.

El estado de Chiapas, México, no es ajeno a la problemática de la generación de residuos agrícolas, siendo la quema sin ningún aprovechamiento de este material, práctica común entre los agricultores en algunas regiones del estado, provocando emisiones de hasta 50 gr de CO<sub>2</sub> equivalente (Jiménez et al. 2011). Dentro de los cultivos más populares se encuentran el maíz (*Zea mays*), el café (*coffea arabica*) y el coco (*cocos nucifera*). Para el año 2013, se tuvo una producción de 1,529,385 toneladas de maíz (quinto lugar a nivel nacional) y 499,105 toneladas de café (primer lugar a nivel nacional) (SIAP, 2014). Cuenta además con una superficie plantada de 2,000 hectáreas de coco, ocupando el séptimo lugar a nivel nacional (CONACOCO, 2012). Debido a lo anterior, el presente trabajo incorpora cascabillo de café (endocarpio), cáscara de coco (mesocarpio) y olote de maíz (raquis) en el proceso de fabricación del ladrillo de cerámica roja, evaluando sus propiedades físicas y mecánicas, de acuerdo con la normatividad nacional. La resistencia a la compresión y prueba de absorción se determinaron conforme a la norma N CMT 2 01 001/02; la NMX-C-441-ONNCCE-2013 y la Norma NMX-C-404-ONNCCE-2012.

## **METODOLOGÍA**

El área de estudio que se propone para el presente proyecto es la Ribera de Cupia, en el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas (Figura 1). Esta área es conocida por su producción ladrillera y se encuentra ubicada al margen izquierdo del río Grijalva, a 9 km, al sureste de Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas. Se ubica entre las coordenadas geográficas 16° 40' 07" latitud norte y 93° 01' 01" longitud oeste,

con un rango de altitud de 200 a 999 msnm. En cuanto a los datos hidrográficos, la Ribera de Cupía pertenece a la cuenca del río Grijalva, así como a la subcuenca del río Santo Domingo. La forma del terreno donde se asienta la localidad está comprendida por laderas tendidas con lomeríos. Éstas se localizan dentro de la provincia fisiográfica Sierras de Chiapas y Guatemala (INEGI, 2010).

El tipo de clima es cálido subhúmedo, con precipitaciones promedio anuales de 991.2 mm; siendo los meses junio y septiembre los que presentan mayor precipitación, en promedio de 211.5 mm y 201.8 mm respectivamente. En contraste, los meses con menor precipitación en promedio son enero y febrero con 0.5 mm y 1.5 mm respectivamente. Por otro lado, la temperatura promedio anual es de 26.7 °C y los meses con las más altas temperaturas son abril y mayo, con 37.1 °C y 36.9 °C respectivamente, mientras que los meses con las más bajas

temperaturas son enero y diciembre, con 15.7 °C y 16.4 °C respectivamente (SMN, 2014).

Para localizar las ladrilleras de la Ribera de Cupía, se realizó un estudio de campo encontrando 5 ladrilleras artesanales (Figura 2). En promedio, trabajan 4 personas en cada una y tienen una producción de 30,000 ladrillos mensuales en época de estiaje. Esta producción se puede reducir a 15,000 ladrillos mensuales en época de lluvia, debido a la complicación de poder secar los ladrillos al aire libre. El costo de este producto en el sitio de fabricación es de setecientos pesos el millar y, dado que no cuentan con vehículos para realizar entregas a domicilio, resultan necesarios los intermediarios para hacer llegar el ladrillo al sitio donde se requiera, por lo que el costo puesto en obra se incrementa por el concepto de flete.



**Figura 1.** Localización de la Ribera de Cupía, Chiapas de Corzo, Chiapas.



**Figura 2.** Localización de ladrilleras en La Ribera de Cupía (1, 2, 3, 4 y 5).

Como se observa en la Figura 3, el proceso de fabricación del ladrillo no ha cambiado mucho a través del tiempo. Éste involucra una serie de pasos, iniciando con el de la extracción de la arcilla con herramienta básica como pico y pala. Posteriormente, sigue el mezclado de la arcilla con agua. Después viene el moldeado con un molde de madera para 5 ladrillos, con medidas de 5 cm de espesor, 13 cm de ancho y 26 cm de largo. Al terminar el moldeado, se deja secar el material y el tiempo de secado varía según las condiciones del clima (puede ser de 3 a 10 días).

La cocción se realiza con hornos intermitentes a cielo abierto, con capacidades máximas de 30,000 ladrillos; el tiempo promedio de cocción es de 30 horas. El combustible que utilizan es madera residual de tarimas que obtienen de una empresa refresquera, cuyas bodegas están próximas a las ladrilleras; estas tarimas están hechas con madera de pino. Por último, el almacenamiento se hace al aire libre a un lado del mismo horno, esperando a los intermediarios para realizar la negociación.

Posteriormente, se recolectaron 10 ladrillos en cada ladrillera y se analizaron en el laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). Se determinaron las diferentes

características físicas y mecánicas que presentaban los ladrillos antes de las adiciones de los residuos agrícolas y se compararon con los parámetros establecidos en las normas nacionales correspondientes. Cabe señalar que para la resistencia a la compresión se obtuvo del promedio de 5 ladrillos ensayados y para la prueba de absorción también se obtuvo de 5 ladrillos de acuerdo a lo establecido en las normas N CMT 2 01 001/02; la NMX-C-441-ONNCCE-2013 y la Norma NMX-C-404-ONNCCE-2012. Además, se tomó una muestra de aproximadamente 50 kg de arcilla, para la determinación de la granulometría, peso volumétrico y límites de plasticidad, mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)

Posteriormente se fabricación nuevos ladrillos con la adicción de residuos agrícolas como son la cáscara de coco, olote de maíz y el cascabillo de café. Para lo anterior, fue necesario recolectar una muestra 50 kg previamente molido en un molino agrícola como se observa en la Figura 4, para cada uno de los residuos agrícolas propuestos, el tiempo de molienda fue de aproximadamente 3 horas para la cascara de coco, 2 horas para el olote de maíz y de una hora para el cascabillo de café.

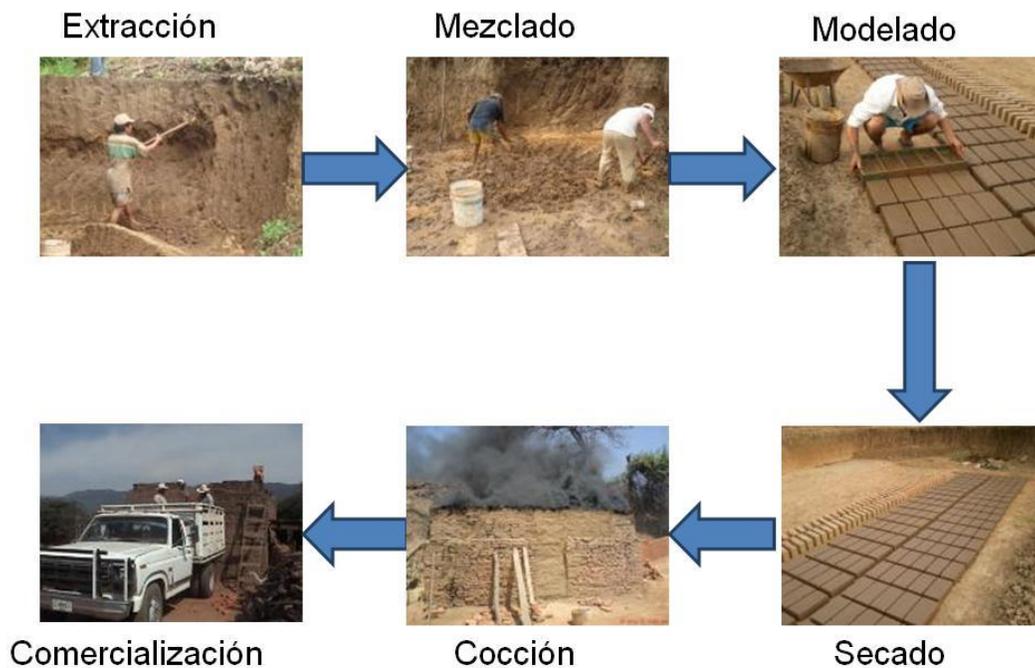


Figura 3. Proceso de fabricación del ladrillo.



Figura 4. Molienda de los residuos agrícolas

En el laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la UNACH se realizaron pruebas de granulometría y peso volumétrico para su caracterización física. Uno de los aspectos importantes de este estudio, fue la fabricación de 15 ladrillos para cada muestra de residuos agrícolas, tomando como base un ladrillo con 0% de adición y los demás con proporciones de 4%, 8% y 12% en peso con cascabillo de café, cáscara de coco y olote, así como su cocción en un horno tipo industrial a 800°C, 900°C y 1,000°C, dando como resultado 10 mezclas diferentes de 15 ladrillos cada una y 3 temperaturas de cocción para obtener un total de 450 ladrillos.

Se analizaron los nuevos ladrillos elaborados con residuos agrícolas en el laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la UNACH, para conocer la resistencia a la compresión y realizar la prueba de absorción, de acuerdo a las normas antes señaladas (Figura 6).

Con los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión y la absorción, se comprobó el número de muestras necesarias para nivel de confianza del 95% y un error muestral del 4%, mediante la ecuación

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{e^2},$$

en donde:

n = número de muestra

$z^2$  = nivel de confianza (para 95%,  $Z = 1.96$ )

$\sigma^2$  = varianza

$e^2$  = error muestral

Posteriormente se analizaron los resultados de la resistencia a la compresión y absorción, mediante una regresión lineal múltiple del tipo  $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n$ , y con el programa estadístico del SPSS (*Statistical Product and Service*

*Solutions*) con el propósito de conocer la correlación entre las variables independientes y la variable dependiente descritas en la Tabla 1.

## RESULTADOS

En la Tabla 2 se observa que todas las ladrilleras cumplen con la norma N CMT 2 01 001/02, la cual establece la resistencia mínima para estructuras de albañilería simple con cargas bajas de compresión axial. También cumplen con la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013, para ladrillos no estructurales. Sin embargo, para la resistencia mínima que especifica la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012 para uso estructural, ninguna de las ladrilleras cumple con este parámetro, incluso existe una gran dispersión de los resultados entre la mínima resistencia de 42.12 kg/cm<sup>2</sup> y la máxima de 91.79 kg/cm<sup>2</sup>.

En la Tabla 3 se observa que las 5 ladrilleras cumplieron con los parámetros máximos establecidos en las normas N CMT 2 01 001/02, NMX-C-037-ONNCCE-2004 y NMX-C-404-ONNCCE-2012, lo que indica que la porosidad del material es adecuada y su capacidad para retener humedad es mínima, lo que impacta directamente en la durabilidad del material.

Después de analizar los especímenes de las 5 ladrilleras, se eligió a la ladrillera 2 de la Figura 2 como referencia para el presente estudio, debido a la disposición del dueño de la misma a participar en el proyecto, así como su adecuada accesibilidad. Posteriormente, se extrajo una muestra de 50 kg de la arcilla y fue llevada al laboratorio de materiales para determinar sus propiedades físicas, mediante el método del S.U.C.S. como se observa en la Tabla 3. Se destaca que la clasificación para este tipo de suelo es de una arcilla arenosa.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la determinación del peso volumétrico y módulo de finura de los residuos agrícolas utilizados en este estudio, como son cascabillo de café, cáscara de coco y olote de maíz. Dichos residuos fueron obtenidos a través de un proceso de molido para utilizarlos en la fabricación de los nuevos ladrillos.



Figura 6.- Prueba de absorción y de resistencia a la compresión.

**Tabla 1.** Variables dependientes e independientes analizadas en una regresión múltiple.

Variable dependiente (Y)	Variable independiente (X <sub>1</sub> )	Variable independiente (X <sub>2</sub> )
Resistencia a la compresión	Cantidad de residuo agrícola	Temperatura de cocción
Absorción de agua	Cantidad de residuo agrícola	Temperatura de cocción

**Tabla 2.** Resistencia a la compresión de ladrillos de 5 ladrilleras diferentes de la región de Cupía, Chiapas.

Ladrillera	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	N CMT 2 01 001/02 (kg/cm <sup>2</sup> )	NMX-C-441-ONNCCE- 2013 (kg/cm <sup>2</sup> )	NMX-C-404-ONNCCE- 2012 (kg/cm <sup>2</sup> )
1	78.9			
2	42.12			
3	47.56	20.3	30	110
4	96.76			
5	91.79			

*Fuente:* UNACH (2013).

**Tabla 3.** Absorción en ladrillos de 5 ladrilleras diferentes de la región de Cupía, Chiapas.

Ladrillera	Absorción máxima en 24 horas (%)	N CMT 2 01 001/02 (%)	NMX-C-441- ONNCCE-2013 (%)	NMX-C-404- ONNCCE-2012 (%)
1	17.96			
2	13.44			
3	18.98	24	25	23
4	14.09			
5	15.94			

*Fuente:* UNACH, 2013

**Tabla 4.** Propiedades físicas de la arcilla mediante el S.U.C.S.

Caracterización física	Valor
Peso volumétrico húmedo del lugar (kg/m <sup>3</sup> ):	1,300
% humedad natural:	8.58
Peso volumétrico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> ):	1,167
% de grava:	0
% de arena:	31.10
% de finos:	68.90
Límite líquido (%):	32.89
Límite plástico (%):	20.07
Índice plástico (%):	12.82
Contracción lineal (%):	4.25
Zona de la carta de plasticidad:	II - CL
Clasificación suelos:	Arcilla arenosa

*Fuente:* UNACH, 2013.

**Tabla 5.** Propiedades físicas de los residuos agrícolas.

Residuo agrícolas	Peso volumétrico (kg/cm <sup>3</sup> )	Módulo de finura
Cascabillo de café	379.17	2.52
Cáscara de coco	104.17	1.08
Olote de maíz	250.00	3.72

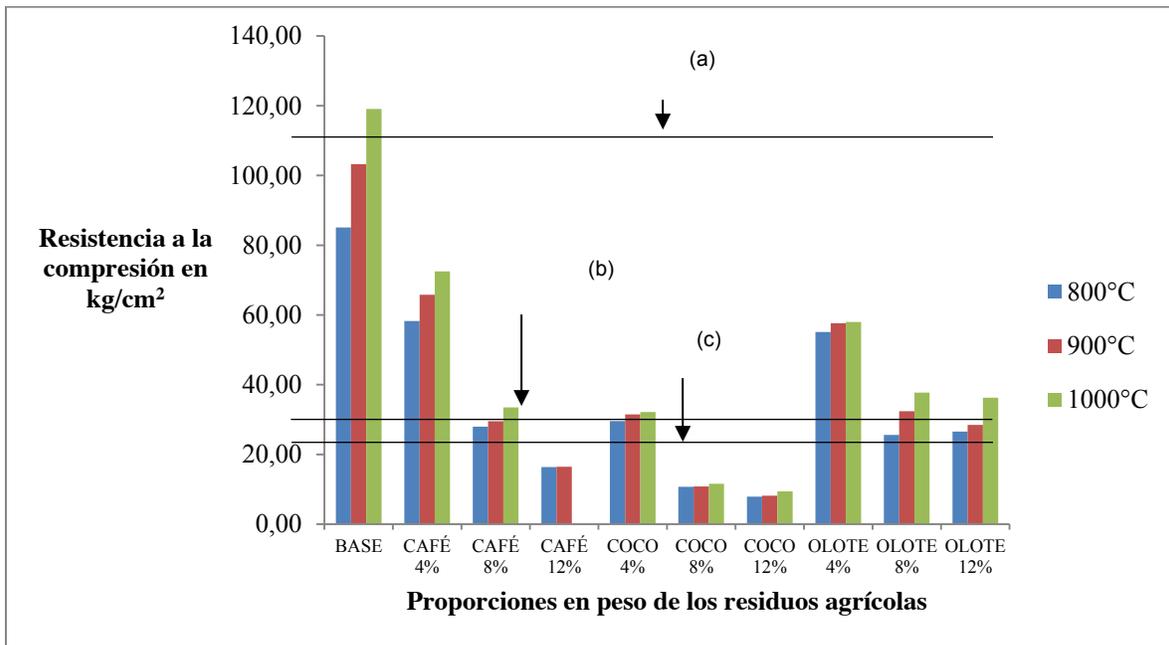
*Fuente:* UNACH, 2013.

Con los resultados del análisis de la arcilla, así como de los residuos agrícolas, se fabricaron los nuevos ladrillos con proporciones de 4%, 8% y 12% en peso con cascabillo de café, cáscara de coco y olote de maíz, a una temperatura de cocción a 800°C, 900 °C y 1,000°C en un horno tipo industrial, cuyos resultados de resistencia a la compresión se pueden observar en la Figura 4.

Los resultados observados en la Figura 7 indican que para alcanzar la resistencia estructural, se debe elevar la temperatura de cocción a alrededor de 1,000°C, debido a la calidad de la arcilla. Por otro lado, para cumplir con los parámetros de las normas de un ladrillo no estructural, se puede adicionar hasta 8% en

peso de cascabillo de café; hasta 12% en peso para el olote; y hasta 4% en peso de cáscara de coco, todos con temperaturas de cocción arriba de los 900°C.

Sin embargo, los resultados de la prueba de absorción de la Figura 8 de los diferentes especímenes observados y siguiendo el mismo criterio del valor de la temperatura entre 900°C y 1,000°C de cocción, para lograr la resistencia a la compresión mínima para ladrillos no estructurales y estructurales, se observa que la máxima adición que permitida es de hasta 4% de cascabillo de café y de olote de maíz, para cumplir las exigencias mínimas establecidas en las normas, mientras que la cáscara de coco no cumple con estos requerimientos.



**Figura 7.** Resistencia a la compresión de los nuevos ladrillos. a) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (110 kg/cm<sup>2</sup>); b) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (30 kg/cm<sup>2</sup>); c) NN CMT 2 01 001/02 (20.30 kg/cm<sup>2</sup>).

Para determinar si la cantidad de ladrillos elaborados para cada una de las mezclas son suficientes para un nivel de confianza del 95% y un error muestral del 4%, se determinó el número de ladrillos necesarios mediante la ecuación  $n = \frac{Z^2 \sigma^2}{e^2}$  en donde:

- n = número de muestra
- $Z^2$  = nivel de confianza (para 95%, Z = 1.96)
- $\sigma^2$  = varianza
- $e^2$  = error muestral

Con la ecuación anterior y con la varianza de la variable de la resistencia a la compresión de 15 ladrillos de cada mezcla, se obtienen los resultados que se observan en la Tabla 6. Cabe señalar que todos los resultados fueron menores a 15 lo que significa

que todas las mezclas están dentro del nivel de confianza propuesto.

Para establecer la correlación que existe entre la Resistencia a la compresión como variable de respuesta o dependiente y la adición de residuos agrícolas, así como la temperatura de cocción como variables independientes, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple con el programa estadístico SPSS.

La mezcla que se tomó como referencia es la de cascabillo de café por tener mejores resultados en cuanto a la resistencia a la compresión en comparación de los otros dos residuos agrícolas. El resumen de los resultados del modelo se observan en la Tabla 7.

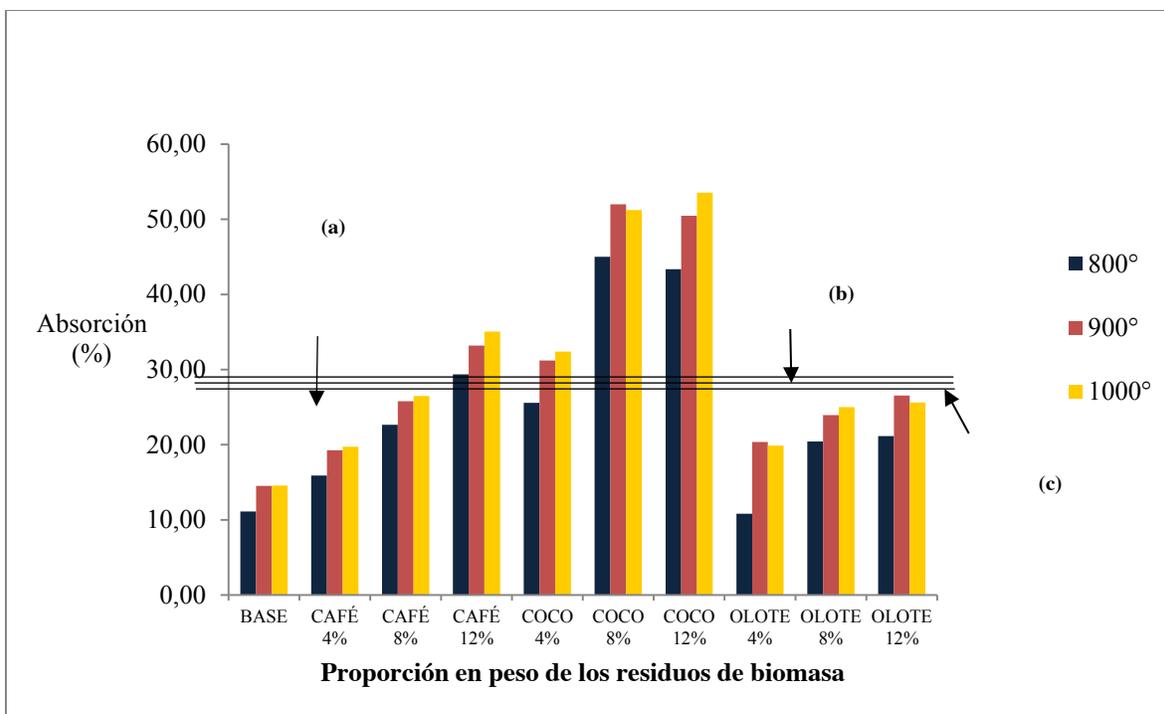


Figura 8. Porcentaje de absorción de los nuevos ladrillos. a) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (25%); b) N CMT 2 01 001/02 (24%); c) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (23%).

Tabla 6. Tamaño de las muestras necesarias para todas las mezclas elaboradas

Proporciones	Tamaño de la muestra necesaria		
	Tamaño de la muestra necesaria (800°C)	Tamaño de la muestra necesaria (900°C)	Tamaño de la muestra necesaria (1,000°C)
Base	10	12	12
Café 4%	8	12	8
Café 8%	2	6	3
Café 12%	2	1	1
Coco 4%	4	8	2
Coco 8%	1	2	1
Coco 12%	1	1	1
Olole 4%	12	4	2
Olole 8%	2	9	3
Olole 12%	3	4	4

Tabla 7. Resumen del modelo de regresión de la resistencia la compresión.

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
0.962	0.925	0.924	9.51

De la Tabla 7, el coeficiente de correlación R es de 0.962 indica que si existe correlación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente, el coeficiente R<sup>2</sup> indica que el modelo explica un 92.5% de la variabilidad en la resistencia a la compresión, el Coeficiente R<sup>2</sup> corregida, considerado el más apropiado para comparar modelos con diferentes número de variables independientes, es de 92.40% y el error típico de la estimación es de 9.51.

En la Tabla 8 se observa los coeficientes del modelo de regresión para la resistencia a la compresión.

**Tabla 8.** Coeficientes del modelo de regresión.

Variables	Coefficientes
Constante	36.870
Proporción	-7.309
Temperatura	.067

Considerando los coeficientes de la Tabla 8 la ecuación resultante es la siguiente:

$$R = 36.870 - 7.309P + 0.067T$$

Donde: R = Resistencia a la compresión  
 P = Proporción de residuo de café adicionado  
 T = Temperatura de cocción

El análisis estadístico para la absorción se realizó de la misma forma que para la resistencia, a la compresión, primero se comprobó que la cantidad de ladrillos analizados sea suficiente para alcanzar un 95% de confianza así como un error muestral del 4%. De acuerdo con lo observado en la Tabla 9, todos los resultados son menores a los 15 ladrillos analizados por lo tanto se cumple satisfactoriamente con el nivel de confianza propuesto

Con respecto a la correlación que existe entre la absorción como variable dependiente y la adición de residuos agrícolas, así como la temperatura de cocción como variables independientes, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple con el programa estadístico SPSS.

De igual forma que la resistencia a la compresión, la mezcla que se tomó como referencia es la de cascabillo de café. El resumen de los resultados del modelo se observan en la Tabla 10.

**Tabla 9.** Tamaño de las muestras necesarias para todas las mezclas elaboradas.

Proporciones	Tamaño de la muestra necesaria (800°C)	Tamaño de la muestra necesaria	
		(900°C)	(1,000°C)
Base	1	1	1
Café 4%	1	1	1
Café 8%	1	1	1
Café 12%	2	2	1
Coco 4%	1	1	12
Coco 8%	5	5	3
Coco 12%	8	8	5
Olote 4%	1	1	1
Olote 8%	12	12	1
Olote 12%	2	2	2

**Tabla 10.** Resumen del modelo de regresión de la absorción.

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
0.967	0.935	0.924	2.01

De la Tabla 10, el coeficiente de correlación R es de 0.967 indica que si existe correlación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente, el coeficiente R<sup>2</sup> indica que el modelo explica un 93.5% de la variabilidad en la resistencia a la compresión, el Coeficiente R<sup>2</sup> corregida, considerado el más apropiado para comparar modelos con diferentes número de variables independientes, es de 92.40% y el error típico de la estimación es de 2.01.

En la Tabla 11 se observa los coeficientes del modelo de regresión para la resistencia a la compresión.

**Tabla 11 Coeficientes del modelo de regresión**

VARIABLES	COEFICIENTES
Constante	2.081
Proporción	1.685
Temperatura	.012

Considerando los coeficientes de la Tabla 11 la ecuación resultante es la siguiente:

$$A = 2.081 + 1.685P + 0.012T$$

Donde: A = Absorción de humedad  
 P = Proporción de residuo de café adicionado  
 T = Temperatura de cocción

**DISCUSIÓN**

En cuanto a la clasificación de la arcilla utilizada para la fabricación del ladrillo, extraída del banco de la ladrillera 2 de la Ribera de Cupía, de acuerdo con los estudios realizados por Santos (2011) y Afanador (2013), se considera de mediana calidad debido a su contenido de arena. Por otro lado, la utilización de residuos agrícolas generados en los campos del estado de Chiapas, incorporándolos a la fabricación de ladrillos de cerámica roja, es factible conforme a las recomendaciones de Raut et al. (2011) y Madurwar et al. (2012).

Los valores con respecto a la resistencia a la compresión y el porcentaje de absorción indican que están directamente relacionados a la cantidad de

residuos agrícolas, es decir a mayor cantidad de residuos, la resistencia la compresión es menor y la absorción es mayor. La temperatura de cocción también influye en las características físicas y mecánicas del ladrillo comprobando que a mayor temperatura se obtiene mayor resistencia y también mayor capacidad de absorción, lo cual es similar a lo investigado por Demir, (2008). Cabe señalar que los residuos agrícolas incorporados en los ladrillos de este trabajo, no tuvieron un proceso de incineración previo con el propósito para aprovechar el poder calorífico de estos residuos en la cocción del ladrillo, al contrario de los trabajos de Chiang et al. (2009), Martínez et al. (2012) y Barbieri et al. (2013), en donde si se incineran los residuos agrícolas antes de la adición a los ladrillos

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los resultados de este trabajo permiten concluir que es factible adicionar residuos agrícolas en la fabricación de ladrillos. Esto se puede lograr siempre y cuando la calidad de la arcilla así lo permita. Para lograr la resistencia a la compresión de un ladrillo estructural empleando la arcilla utilizada en este trabajo, es necesario elevar la temperatura de cocción alrededor de 1,000°C. Para el caso del ladrillo no estructural, se recomienda elevar la temperatura a 900°C; este último permite la adición de cascabillo de café y olote hasta un 4% en peso, con excepción de la cascara de coco que no cumple con los requerimientos mínimos de absorción. Otra ventaja que se logra con la incorporación de residuos agrícolas, es que se le da un valor agregado a este residuo, que normalmente es incinerado en el lugar donde se genera, provocando la contaminación del suelo, agua y el aire.

Se recomienda continuar con el estudio de la adición de residuos agrícolas en la elaboración de ladrillos, pero empleando arcillas de mejor calidad, así como realizar estudios de densidad, conductividad térmica y ahorro energético, lo anterior para establecer comparaciones con los ladrillos fabricados de manera tradicional y poder evaluar sus ventajas y desventajas.

**RECONOCIMIENTO**

Se agradece a la Universidad Autónoma de Chiapas, quién proporcionó la beca económica para la realización de los estudios de Doctorado, así como las facilidades para la realización de este trabajo y a la empresa CERAMITEX por su asesoría técnica en la fabricación de los ladrillos.

**REFERENCIAS**

Afanador N., Ibarra J., López C., (2013). *Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander*. “Épsilon”, No. 20, pp. 101-119.

Barbieri L., Andreola F., Lancellotti I., Taurino R. (2013). *Management of agricultural biomass wastes: preliminary study on characterization and valorization in clay matrix bricks*. “Waste Management” No. 33, pp. 2307-2315.

N-CMT-2-01-001/02 (2002). “*Características de los materiales, Materiales para estructuras, Materiales para mampostería, Ladrillos y bloques cerámicos*”. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 9 p.

CONACOCO, A.C (2012). “*Plan rector sistema producto nacional palma de coco*”, Consejo Nacional del Cocotero, A.C., México D.F.47 pp.

Chiang K.Y., Chou P.H., Hua, C.R., Chien K.L., Cheeseman C. (2009). *Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks*. “Journal of Hazardous Materials”, No. 171, pp. 76-82.

Demir I. (2008). *Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks*. “Waste Management”, No. 28, pp. 622-627.

UNACH (2013), “*Reportes de pruebas de laboratorio de Resistencia a la compresión y absorción*”, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 10 pp.

INEGI (2010), “*México en cifras*”, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informáticas Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras>. Consultado el día 11 de octubre de 2014.

Jiménez G., Marinidou E., Flores A., Jong B., Ochoa S., Olgún M. (2011), “*Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Chiapas*”. Colegio de la Frontera Sur. 38 pp.

Madurwar M., Ralegaonkar R., Mandavgane S. (2013). *Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review*. “Construction and Building Materials”, No. 38, pp. 872-878.

Martinez M., Eliche D., Cruz N., Corpas A. (2012). *Utilization of bagasse from the beer industry in clay brick production for building*. “Materiales de Construcción”, No. 62, pp. 199-212.

NMX-C-404-ONNCCE (2012), “*Industria de la construcción – mampostería – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural –especificaciones y métodos de ensayo*”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. México.

NMX-C-441-ONNCCE (2013), “*Industria de la construcción – mampostería – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural –especificaciones y métodos de ensayo*”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. México.

Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. (2011). *Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid wastes: A review of waste-create bricks*. “Construction and Building Materials”, No. 25, pp. 4037-4042.

Santos J., Malagon P., Cordoba E. (2011). *Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander*. “Dyna Revista de la Facultad Nacional de Minas”, No. 78, pp. 50-58.

SIAP (2014). “*Cierre de la producción agrícola por estado*”, Servicio de alimentación, Agropecuaria y Pesquera, disponible en <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>. Consultado el día 10 de octubre de 2014.

SMN (2014). “*Normales meteorológicas*”, Sistema Meteorológico Nacional, [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=174&tmpl=component](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=174&tmpl=component). Consultado el 25 de noviembre de 2014.

---

Este documento debe citarse como: González García E., Lizárraga Mendiola L. (2015). **Evaluación de las propiedades físico mecánicas de ladrillos de arcilla recocida, elaborados con incorporación de residuos agrícolas, caso Chiapas, México**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 91-101, ISSN 1665-529-X.

# Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán

W. D. Mena-Novelo, R.A. Un-Aragón, J.E. Corona, M. Romero, A.I. Oliva<sup>1</sup>

*Fecha de recepción: marzo de 2014 – Fecha de aprobación: marzo 2015*

## RESUMEN

Se discute la metodología implementada para determinar la conductividad térmica  $k$  de materiales en polvo de uso común en la Península de Yucatán. El sistema implementado, basado en las normas ASTM C-177 y C-508, permite determinar la  $k$  de materiales en estado sólido. Se construyó y caracterizó un sistema experimental adiabático en geometría de paralelepípedo con paredes de poliestireno de 10 cm de espesor y un foco incandescente como fuente de calentamiento y potencia controlada con un autotransformador variable. Conociendo la potencia aplicada al sistema, mediante un balance térmico se determinaron las pérdidas involucradas en el sistema adiabático, así como la potencia neta que se aplica en el recipiente contenedor de la muestra a analizar. Para mayor confiabilidad en las mediciones realizadas, se automatizó el sistema de captura y se reportaron los valores promedio de las mediciones realizadas. Se reporta el valor de  $k$  de un grupo de materiales en polvo de uso común en la región como: arena de mar, yeso, cemento gris, tierra roja, tierra negra, polvo de piedra, polvo de piedra fino y cerámica comercial, siendo el yeso el material con menor valor de  $k = 0.04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  medido, el cual lo hace adecuado como material para aislamiento térmico.

**Palabras clave:** conductividad térmica, materiales en polvo, cámara adiabática.

## Determination of the thermal conductivity of powders of the Yucatan Peninsula

### ABSTRACT

A methodology for determining the thermal conductivity  $k$  of powdered materials of the Yucatan's Peninsula is discussed. The implemented system based on the C-177 and C508 ASTM standards permits to estimate the thermal conductivity of solid state materials. An adiabatic chamber with 10 cm-thickness polystyrene walls and an incandescent spotlight with controlled power through a variable autotransformer was implemented and characterized. By knowing the applied power to the system, the thermal losses of the adiabatic chamber were estimated from a thermal balance, as such as the useful heat flowing through the samples container. For high reliability, the measurement of temperature and the captured data were automatized and the mean values were reported. We report the  $k$  values obtained from samples of sea sand, plaster, maya's cement, red land, black land, rough stone powder, fine stone powder, and commercial ceramic. The plaster was found to be the material with minor thermal conductivity,  $k = 0.04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ , which is appropriate to be used as thermal isolator.

**Keywords:** thermal conductivity, powdered material, adiabatic chamber.

<sup>1</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados el IPN Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, A.P. 73-Cordemex, 97310 Mérida Yucatán México. Correo electrónico: oliva@mda.cinvestav.mx

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

## INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica  $k$  de un material sólido es un parámetro térmico que es utilizado para diseñar, predecir o proponer dispositivos y metodologías para un mejor uso de la energía consumida (Antoni y Mills, 1999). Su valor depende de muchos factores, sobre todo de las propiedades físicas del material, tales como densidad, estructura cristalina, entre otras Welty et al., 1999). En conductores, es altamente deseable que el material posea un alto punto de fusión y que tenga una ordenación cristalina que permita una buena transferencia del calor. En materiales aislantes, es deseable que el material tenga un alto punto de fusión, una baja densidad y bajos puntos de fusión y flamabilidad. Los valores de  $k$  de los materiales están reportados en libros de texto de transferencia de calor o en manuales de Ingeniería, donde para cada valor reportado, están establecidas las condiciones y características del material analizado. Sin embargo, se sabe que una arena de la costa del pacífico es muy diferente a una arena del Golfo de México, lo que hace indispensable establecer los valores de  $k$  para cada tipo específico de material. Una manera muy común de determinar el valor de la conductividad térmica  $k$  es a través de la conocida ecuación de Fourier (Kern, 2001) para la conducción del calor. Asumiendo un material en geometría de placa plana que se le hace pasar un flujo de calor, la ecuación de Fourier está dada por:

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Donde  $Q$  es el flujo de calor que atraviesa la pared,  $A$  es el área transversal al flujo de calor,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre las paredes del material y  $\Delta x$  es el espesor de la pared del material por el cual atraviesa el flujo de calor. El signo negativo implica que la transferencia del calor fluye de una temperatura mayor a una menor. Para determinar el valor de  $k$  es necesario conocer y controlar las variables de la ecuación 1. Esto es:

$$k = -\frac{Q\Delta x}{A\Delta T} \quad (2)$$

La *American Society for Testing Materias* (ASTM) ha propuesto las normas C-177 y C-508 (ASTM C-177. 1997, ASTM C-518. 2002) para establecer una metodología estándar para medir el valor de  $k$  de materiales sólidos.

En México, la Secretaría de Energía, dicta las normas de ahorro y eficiencia de energía a través de las NOM (Normas Oficiales Mexicanas) (NOM-008-2001, NOM-018-1997, NOM-020-

2008). Estas normas de carácter obligatorio relacionadas con la eficiencia de energía son las NOM-008, NOM-018 y NOM-020, donde se requiere la determinación de las propiedades físicas de los materiales y en particular la conductividad térmica  $k$ .

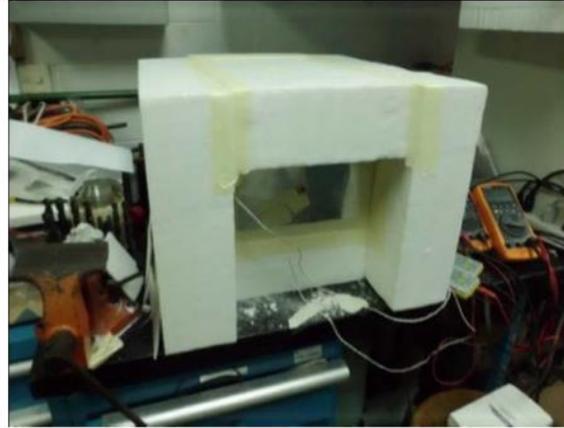
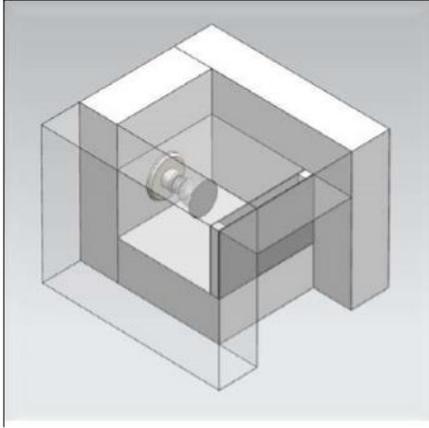
Siguiendo de cerca estos lineamientos y los procesos de transferencia de calor, en este trabajo se reportan el sistema experimental, las mediciones realizadas, así como los valores obtenidos de conductividad térmica  $k$  de algunos materiales en polvo que son ampliamente utilizados en la región de la Península de Yucatán con el fin de conocer su valor y con ello potenciar otras posibilidades de utilización.

### La cámara adiabática

Para la determinación experimental de  $k$ , se diseñó y construyó una cámara tipo adiabática (sin pérdidas de calor) donde en forma controlada podemos aplicar un flujo de calor al material a analizar y medir su respuesta térmica, conociendo su geometría. La cámara adiabática se construyó en forma de paralelepípedo ( $25 \times 25 \times 15 \text{ cm}^3$  interior) usando placas de poliestireno de 10 cm de espesor (Figura 1). Una pared vertical de menor área de la cámara fue utilizada para ubicar el recipiente metálico contenedor de la muestra en polvo a analizar. Como fuente de calor, se utilizó un foco incandescente ubicado en el interior de la caja y frente a la pared de la muestra a estudiar. La potencia aplicada a la muestra es controlada usando un autotransformador variable (*variac*).

Una pantalla de aluminio colocada sobre el foco evita que la radiación térmica emitida llegue a la muestra en forma directa. En cada pared interior y exterior del contenedor metálico se colocan tres sensores de temperatura electrónicos tipo LM-35 con una resolución de  $0.01^\circ\text{C}$  para medir los perfiles de calentamiento de la muestra a analizar.

Para determinar el valor de  $k$  de la muestra se utiliza el cambio de temperatura promedio ocasionado por el flujo de calor a través del contenedor de la muestra una vez que el sistema térmico alcanza el estado estacionario. El flujo de calor aplicado al sistema se determina con el producto de la corriente y voltaje aplicado al elemento calefactor. Este flujo de calor se aplica a las 6 paredes interiores de la cámara adiabática y requiere de un balance de energía para conocer el flujo de calor que atraviesa únicamente por la muestra analizada. Por ello, es necesario realizar una calibración de la cámara adiabática antes de proceder a la medición de las muestras.



**Figura 1.** Esquema y fotografía de la cámara adiabática implementada para medir el valor de la  $k$  de materiales en polvo.

Para realizar el balance térmico de los procesos de transferencia de calor involucrados en el sistema implementado, hacemos uso de las ecuaciones de conservación de la energía:

$$Q = Q_u + Q_{perd} \quad (3)$$

Donde  $Q=VI$  es el flujo de calor eléctrico ( $V$  voltaje,  $I$  corriente) proporcionada por la fuente de calor,  $Q_u$  es el flujo de calor útil aprovechado por el sistema y  $Q_{perd}$  es el flujo de calor perdido por conducción, convección y radiación en los alrededores de la cámara. El término  $Q_u$  se determina mediante la relación:

$$Q_u = k_m A_m \frac{(T_{1m} - T_{sm})}{\Delta x_m} + h A_m (T_{1m} - T_{sm}) + \varepsilon \sigma A_m (T_{sm}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

Donde el subíndice  $m$  hace referencia a los parámetros respecto de la muestra o cada pared de la cámara. Los tres términos del lado derecho de la ecuación 4 se refieren al flujo de calor útil por conducción, convección y radiación. En forma análoga, el término  $Q_{perd}$  se determina con la relación:

$$Q_{perd} = k_p A_p \frac{(T_{1p} - T_{sp})}{\Delta x_p} + h A_p (T_{1p} - T_{sp}) + \varepsilon \sigma A_p (T_{sp}^4 - T_{\infty}^4) \quad (5)$$

Aquí el subíndice  $p$  se refiere a la pérdida parcial de cada pared involucrada en la cámara adiabática. Para la determinación del valor de la conductividad térmica  $k_{PE}$  del PE utilizado como

material aislante del calor en las paredes de la cámara adiabática, se hace uso de la ecuación:

$$k_{PE} = \frac{(Q - Q_{perd} - Q_{convm} - Q_{radm}) \Delta x_{PE}}{A_{PE} (T_{1PE} - T_{sPE})} \quad (6)$$

Y para la conductividad térmica  $k_m$  de cada material analizado, utilizamos la relación:

$$k_m = \frac{(Q - Q_{perd} - Q_{convPE} - Q_{radPE}) \Delta x_m}{A_m (T_{1m} - T_{sm})} \quad (7)$$

Donde los parámetros mencionados significan:

$A$  = área de transferencia de calor del elemento involucrado.

$\Delta x$  = espesor de la pared.

$T_j$  = temperatura interior de la pared.

$T_s$  = temperatura exterior de la pared.

$T_{\infty}$  = temperatura ambiente = 25°C (temperatura del laboratorio).

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared:  $h = 2.28$  W/m °C para paredes verticales y  $h = 2.60$  W/m °C para paredes horizontales.

$\varepsilon$  = emisividad de la superficie ( $\varepsilon = 0.9$  para el PE).  
 $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman,  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>.

$Q_{conv}$  = flujo de calor perdido por convección.

$Q_{rad}$  = flujo de calor perdido por radiación.

### Programa para captura de datos en tiempo real

Una vez desarrolladas las relaciones involucradas en los procesos de transferencia de calor, se procedió a desarrollar un programa para la captura de los datos de temperatura medidos mediante el

software *LabView* 7.0. El programa permite capturar las temperaturas interior y exterior de las superficies del contenedor metálico de la muestra, así como la temperatura ambiente durante todo el proceso de calentamiento. La pantalla principal del programa desarrollado se muestra en la Figura 2. El programa permite capturar, mediante una tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6216, los datos de temperatura provenientes de los sensores electrónicos LM-35 y mostrarlos en tiempo real en forma gráfica en función del tiempo de muestreo. Con el programa es posible controlar la velocidad de muestreo, así como generar un archivo .dat para su posterior análisis y graficación.

**Metodología para la medición de  $k$  Calibración de la cámara adiabática.** Aunque la cámara adiabática construida asume que las pérdidas de calor son nulas, en la práctica esto no es así. Por ello se hace necesario determinar las pérdidas del sistema adiabático. Dado que las paredes de la cámara poseen un valor de conductividad térmica, cierta cantidad del calor aplicado se pierde por conducción, convección y radiación por las paredes que la conforman. Un primer experimento realizado para calibrar nuestra cámara adiabática construida fue medir el valor de la  $k$  del poliestireno (PE) utilizado para conformar las paredes adiabáticas usando el proceso de

transferencia de calor por conducción a través de las paredes de PE. Para ello se realizaron diferentes mediciones usando diferentes potencias aplicadas en el interior de la cámara y se midieron las temperaturas superficiales del interior y del exterior de las paredes de PE. El valor de  $k$  reportado para el PE en la literatura es de  $k = 0.06$  W/m K [7], aunque este valor puede ser diferente dependiendo de la densidad del PE utilizado. La Figura 3 muestra un perfil de calentamiento típico medido para determinar la  $K$  del PE.

Puede observarse que la estabilidad térmica se alcanza después de 120 min. Para determinar el valor de  $k$ , el gradiente de temperatura  $\Delta T$  obtenido en cada experimento, es el valor promedio de los valores obtenidos durante el tiempo de estabilización medido, el cual es señalado con recuadros grises en la Figura 3, así como el área  $A$  y el espesor  $\Delta x$  de la muestra. La Tabla 1 resume los valores medidos y calculados correspondientes a 5 diferentes experimentos realizados para el PE, así como los valores de la  $Q$  aplicada, el valor de  $k_{PE}$  obtenido y su incertidumbre asociada. Para fines prácticos, el valor de  $k_{PE}$  se considerará como el valor promedio de los experimentos realizados.

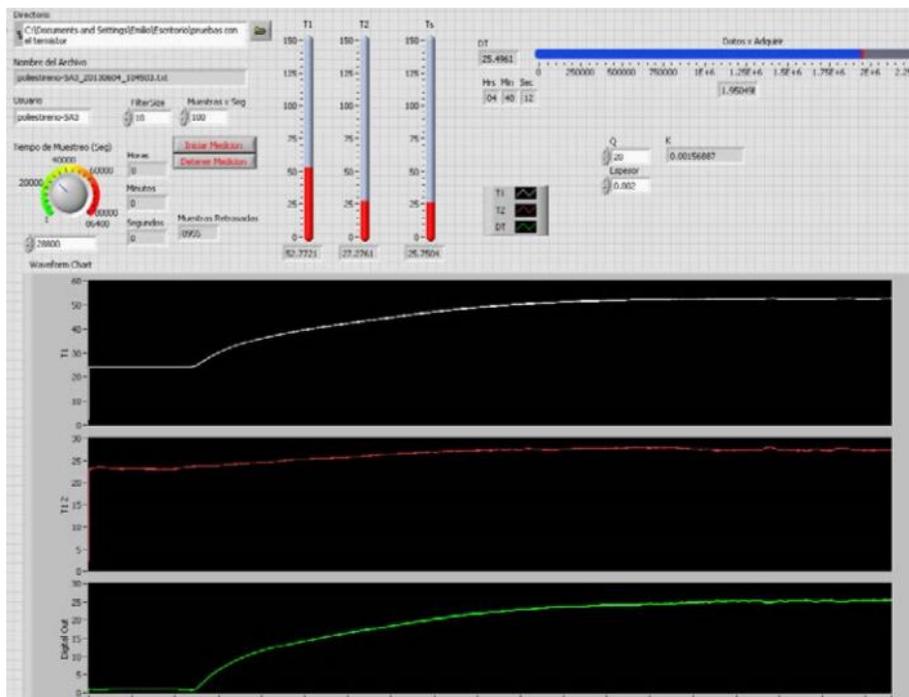


Figura 2. Pantalla principal del software desarrollado para la captura de las temperaturas en tiempo real.

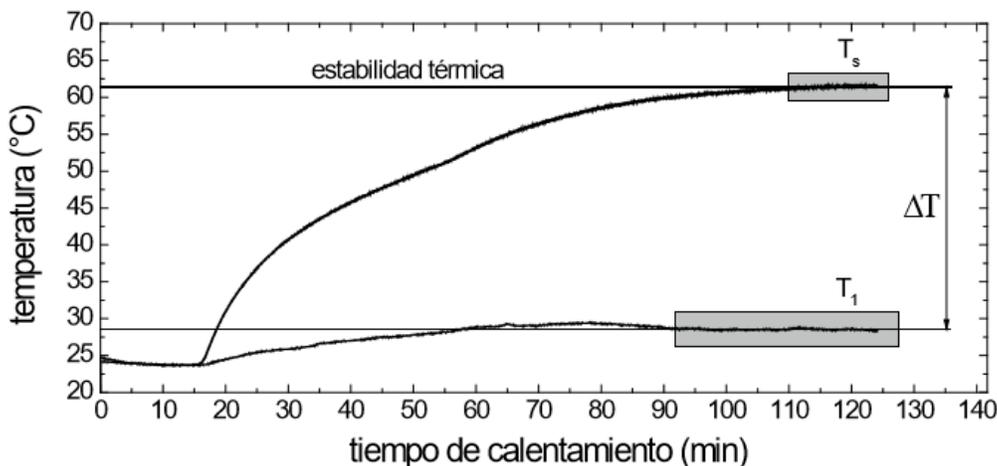


Figura 3. Perfil de calentamiento medido por conducción a través del PE.

**Tabla 1.** Datos experimentales obtenidos durante las diferentes mediciones realizadas para determinar la conductividad térmica del poliestireno (PE).

Muestra	$T_1$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$T_\infty$ (°C)	I (A)	V (V)	Q [W]	$k_{PE}$ [W/m°C]	$\delta k_{PE}$ [±]
PE_1	64.83	33.71	31.12	25.01	0.26	38.16	9.92	0.052	0.004
PE_2	63.29	29.42	33.87	25.50	0.26	37.66	9.79	0.057	0.005
PE_3	61.39	28.53	32.86	25.93	0.36	29.25	10.53	0.063	0.004
PE_4	52.47	28.59	23.88	25.75	0.32	24.70	7.90	0.060	0.004
PE_5	51.77	28.22	23.55	26.89	0.32	24.80	7.94	0.046	0.003
							<b>Prom.</b>	<b>0.056</b>	<b>0.004</b>

Así, de la Tabla 1, el valor medido de la conductividad térmica del PE es de  $k_{PE} = 0.056 \pm 0.004$  W/m °C, valor muy cercano a la valor reportado en los manuales de  $0.060$  W/m °C [7]. Este valor medido será de gran utilidad para determinar la  $k$  de los diferentes materiales en polvo a analizar, ya que se medirán usando la misma cámara adiabática calibrada.

**Determinación de  $k$  de los diferentes materiales en polvo estudiados.** El valor de  $k$  de cada muestra en polvo analizada se determina usando la ecuación 5 y midiendo las variables similares a las medidas para el experimento del PE. La Figura 4 muestra las diferentes muestras de los materiales en polvo medidos en este trabajo.

Para las mediciones, se debe evitar generar poros al introducir los materiales en el contenedor metálico con el fin de que el espesor de la muestra en polvo (2.0 cm) sea uniforme para la

conducción del calor. En el caso de las tierras y polvos de piedra, se tuvo el cuidado de que las muestras tengan un tamaño similar de partícula, usando para ello un tamizador. La muestra de material a analizar es colocada en un contenedor de aluminio de  $21 \times 14 \times 2$  cm<sup>3</sup> y colocada como una pared vertical de la cámara adiabática. Se cierra herméticamente la cámara y se procede a aplicar un flujo controlado de calor. Durante el proceso de calentamiento se mide su perfil térmico hasta alcanzar las condiciones de estabilidad térmica. Una vez estable, se determina el valor de  $\Delta T$  alcanzado entre las paredes interior y exterior y con la ecuación 7, el valor de  $k$ .

## RESULTADOS

La Figura 5 (a y b) muestra los perfiles típicos obtenidos del gradiente de temperatura correspondiente a cada muestra en polvo analizada. Las curvas representan el valor promedio de tres mediciones realizadas en cada

material bajo condiciones similares. Puede observarse que se requirió cerca de 300 min (5 h) para alcanzar el estado estacionario en cada caso. El valor promedio de  $\Delta T$  de cada muestra analizada es utilizado para calcular el valor de  $k$  de cada material.

La Tabla 2 muestra los resultados de una medición típica de un grupo de tres diferentes mediciones realizadas usando la tierra negra como muestra. Se reportan las temperaturas interior, exterior y ambiente, la potencia utilizada para la prueba y los valores de  $k$  determinados con las variables medidas. De estos valores medidos bajo condiciones similares, se obtiene un valor

promedio que es reportado como la  $k$  del material analizado.

Finalmente, después de realizar obtener todas las mediciones de los perfiles de calentamiento en estado estacionario de cada material estudiado, se calcularon los valores de  $k$  y los resultados correspondientes se reportan en la Tabla 3. De la Tabla 3 se concluye que los materiales analizados presentan un valor de  $k$  entre 0.085 y 0.040 W/m°C, correspondientes al grupo de materiales aislantes, siendo el yeso comercial el que obtuvo el menor valor de  $k$ .



Figura 4. Muestras de los diferentes materiales en polvo a quienes se midió el valor de la conductividad térmica  $k$ .

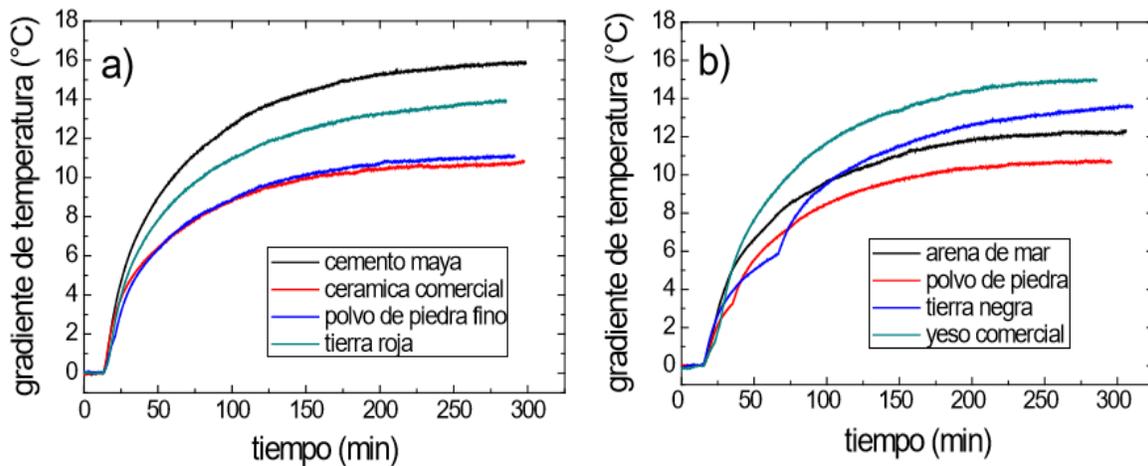


Figura 5. Gradientes de temperatura medidos para las diferentes muestras de materiales en polvo analizadas.

**Tabla 2.** Valores obtenidos en la experimentación de la muestra de tierra negra.

Material	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	ΔT (°C)	T <sub>∞</sub> (°C)	I (A)	V (V)	Q (W)	k (W/m°C)	δk (W/m°C)
Tierra negra1	46.50	33.09	13.41	27.38	0.33	24.94	8.23	0.059	0.004
Tierra negra2	46.78	33.15	13.63	27.31	0.33	24.90	8.22	0.060	0.004
Tierra negra3	46.85	32.99	13.86	26.42	0.33	24.88	8.21	0.053	0.003
<b>Promedio</b>	<b>46.71</b>	<b>33.08</b>	<b>13.63</b>	<b>27.37</b>	<b>0.33</b>	<b>24.91</b>	<b>8.22</b>	<b>0.057</b>	<b>0.004</b>

**Tabla 3.** Valores obtenidos en la experimentación para los diferentes materiales en polvo de la región. En las últimas columnas se reportan los valores promedio de *k* y las incertidumbres asociadas.

Material	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	ΔT (°C)	T <sub>∞</sub> (°C)	I (A)	V (V)	Q <sub>prom</sub> (W)	k <sub>prom</sub> (W/m°C)	δk (W/m°C)
Arena de mar	44.94	32.67	12.27	26.60	0.32	24.90	8.05	<b>0.057</b>	0.004
Polvo de piedra	43.84	33.15	10.69	26.43	0.33	24.90	8.13	<b>0.085</b>	0.006
Tierra negra	46.71	33.08	13.63	26.37	0.33	24.90	8.22	<b>0.057</b>	0.004
Yeso Comercial	47.80	32.74	15.06	26.53	0.33	24.87	8.21	<b>0.040</b>	0.003
Cemento Maya	47.63	31.80	15.83	25.96	0.33	24.85	8.20	<b>0.085</b>	0.005
Cerámica comercial	44.77	33.93	10.84	26.49	0.33	24.90	8.22	<b>0.059</b>	0.003
Polvo de piedra fino	44.25	33.19	11.06	26.42	0.33	24.90	8.22	<b>0.084</b>	0.005
Tierra Roja	46.59	32.68	13.91	26.42	0.33	24.83	8.20	<b>0.058</b>	0.003

### CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de medición para determinar la conductividad térmica *k* de un grupo de ocho materiales en polvo de la Península de Yucatán basado en las normas ASTM C-177 y C-08. Para ello, se construyó una cámara adiabática con paredes de poliestireno de 10 cm de espesor y mediante un balance térmico, se determinaron las pérdidas de calor útil que se aprovecha en dicha cámara. Midiendo el gradiente de temperatura generado entre las paredes de la muestra analizada y usando la ley de Fourier para la conducción del calor y la geometría de la misma, es posible

determinar el valor de *k* de los materiales en polvo. La conductividad térmica de yeso, tierra negra, tierra roja, cemento maya, cerámica comercial, arena de playa, polvo de piedra y polvo de piedra fino fueron determinados usando esta metodología. Los valores de *k* oscilaron y entre 0.040 y 0.085 W/m °C, siendo el yeso el material con menor conductividad térmica medida. Los valores reportados pueden ser de gran utilidad para estudios de suelos y su uso en cultivos, así como para nuevas aplicaciones en áreas no convencionales de los procesos térmicos.

### REFERENCIAS

Antoni F. Mills, (1999) Heat transfer, 2a Ed., Prentice Hall PTR, Los Angeles USA.

ASTM C-177. (1997) Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. West Conshohocken PA, ASTM International.

ASTM C-518. (2002) Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. West Conshohocken PA, ASTM International.

Kern D. Q., (2001). Procesos de transferencia de calor, 3ª Ed., CECSA, México.

Normas Oficiales Mexicanas, NOM-008-2001, NOM-018-1997, NOM-020-2008, Secretaria de Energía, México.

Welty, J.R. Wicks Ch. E. y R.E. Wilson (1999) Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, 2ª Ed., Limusa, México, 1999.

---

Este documento debe citarse como: Mena-Novelo W. D., Un-Aragón R.A., Corona J.E., Romero M., Oliva A.I. (2015) **Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 85-90, ISSN 1665-529-X.

# Evaluación de la toxicidad puntual en un sitio de disposición final de residuos municipales

Sosa-Olivier José Aurelio, Laines-Canepa José Ramón, Enríquez-Murguía Jorge Francisco, Molina Fernando, Bautista-Martínez Liliana, Segura-García Andrea Eduviges, Hernández-Alcudia Sheyla Esthefany

*Fecha de recepción: febrero de 2015 – Fecha de aprobación: mayo 2015*

## RESUMEN

En el año 2014 se llevó a cabo la determinación de toxicidad de cinco puntos con evidencia de acumulación de lixiviados, cercanos al frente de trabajo de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos. Se determinaron parámetros físicoquímicos y metales pesados como Cn, Cu, Cr, Fe, Ni, Zn. Para conocer el grado de toxicidad, se realizó un bioensayo de evasión con lombrices de tierra *E. foetida*, contrastando muestras de los cinco puntos con un punto tomado a 250 m de distancia al frente de trabajo. Los resultados obtenidos, demuestran la presencia de algunos de los metales de interés, se determinó una evasión >70 %. Se realizó una prueba de Tukey, obteniendo un valor de  $p < 0.05$ , lo que concluye que el punto número 3, fue el que presenta mayor toxicidad, alcanzando el 100% de evasión.

**Palabras clave:** *E. Foetida*, bioensayo, metales pesados, níquel.

# Evaluation of toxicity in a timely final site municipal waste disposal

## SUMMARY

In 2014 was conducted to determine toxicity of five points, with evidence of leachate accumulation, near the working face of a final disposal site for solid waste. Physicochemical parameters and heavy metals as Cn, Cu, Cr, Fe, Ni, Zn were determined. To determine the degree of toxicity bioassay was performed with evasion earthworms *E. foetida* land, contrasting samples of the five points with a point taken at 250 m distance work front. The results obtained show the presence of some of the metals of interest, an escape > 70% was determined. Tukey test was performed, obtaining a value of  $p < 0.05$ , which concludes that the point 3, which was the most toxic, reaching 100% avoidance.

**Index words:** *E. foetida*, bioassay, heavy metals, nickel.

---

<sup>1</sup>División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 0.5 km Carretera Villahermosa Cárdenas. Villahermosa, Tabasco. C.P. 86130. México.  
Correo electrónico: ing-jaso@hotmail.es

**Nota:** El periodo de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

## INTRODUCCIÓN

Los sitios de disposición final (SDF) de residuos, han sido una tecnología muy usada en el manejo integral de los residuos sólidos urbanos (RSU). Sin embargo, cuando los sitios no cumplen con la normativa (NOM-083-SEMARNAT-2003, para el caso de México), además de una operación y mantenimiento inadecuado, estos sitios se convierten en tiraderos a cielo abierto (TACA).

Los impactos ambientales que generan los TACA es la migración de contaminantes, por lixiviados, emisiones de gases de efecto invernadero como el metano y dióxido de carbono, por la descomposición anaerobia de la fracción orgánica y cuando existe quema de RSU, se liberan contaminantes como metales pesados, hidrocarburos, compuestos orgánicos semivolátiles (SVOC), bifenilos policlorados (PCB) y dioxinas y furanos (Volke *et al.* 2005, Zairi *et al.*, 2004 y Atencio *et al.*, 2013).

Todo SDF genera lixiviados, los cuales se forman principalmente por la percolación de las aguas meteóricas a través de la masa de residuos, sin embargo, en la mayoría de los casos los RSU contienen cantidades de agua suficientes para generar lixiviados, aún sin la entrada de aguas meteóricas (Robles 2008).

Los lixiviados producidos en los SDF normalmente contienen metales como Cu, Zn, Pb y Hg (Volke *et al.*, 2005). El manejo inadecuado de los lixiviados, provoca la migración de contaminantes inmersos, en el suelo natural de zonas aledañas a los sitios, provocando su deterioro y acumulación de sustancias contaminantes. Pastor y Hernández (2012), reportan los siguientes valores, 6.3 a 7.6 de pH, 5047 a 28,453 mg Fe kg<sup>-1</sup>, 46 a 552 mg Mn kg<sup>-1</sup>, 13.8 a 960 mg Zn kg<sup>-1</sup>, 2.5 a 3,680 mg Cu kg<sup>-1</sup>, 0 a 797 mg Pb kg<sup>-1</sup>, 0 a 10 mg Cd kg<sup>-1</sup>, 0 a 17 mg Cr kg<sup>-1</sup>, 0 a 32 mg Ni kg<sup>-1</sup>, 0 a 9 mg Co kg<sup>-1</sup>, 15,250 a 65,790 mg Al kg<sup>-1</sup>, obtenidos muestras de suelo a una profundidad de 10 cm del suelo y las muestras de control tomadas a una profundidad de 15 cm, en terrenos de pastoreo de los alrededores a un SDF. Kasassi *et al.* (2008) reportan valores de metales en rangos de concentración, 0.50 a 18.75 mg Cd kg<sup>-1</sup>, 3.88 a 171.88 mg Cr kg<sup>-1</sup>, 8.13 a 356.25 mg Cu kg<sup>-1</sup>, 5.63 a 63.75 mg Ni kg<sup>-1</sup>, 2.50 a 92.50 mg Pb kg<sup>-1</sup> y 6.38 a 343.75 mg Zn kg<sup>-1</sup>, las muestras fueron obtenidas en excavaciones de más de 2.5 m de profundidad.

En las últimas dos décadas el uso de bioensayos, con el uso de organismos para determinar efectos adversos de algún contaminante, han tenido gran auge. La aplicación de microcosmos en laboratorio se ocupa de la variabilidad y la reproducibilidad, al igual que ayudan a la comprensión de los efectos ambientales (Cairns y Pratt, 1988, Teuben y Verhoef, 1992, Lisa *et al.*, 2002).

Las lombrices de tierra, a diferencia de otros grupos de organismos del suelo, son organismos muy sensibles a los productos químicos, por ello el uso de diversas especies de lombrices como la *E. foetida*, en pruebas de evasión, crecimiento y reproducción, al igual de ensayos oxidativos (Römbke, 2003, Li *et al.*, 2011).

Existe un bioensayo denominado, prueba de evasión, esta se basa en la evaluación de efectos sub letales caracterizados por el comportamiento de evasión de las lombrices, para la cual se mide el número de lombrices que se desplazan desde un suelo contaminado y que, por tanto, evaden la exposición, considerando esta conducta como un parámetro ecológico pertinente para evaluar la nocividad de los suelos contaminados con metales u otras sustancias (Lukkari y Haimi, 2004, Cuevas *et al.*, 2012). Römbke y Moser (1999) mencionan tiempos desde dos a nueve semanas en bioensayos con lombrices, además de su uso en la determinación de ciertos contaminantes como PAC, PCB, Cd, Cu, Pb, Zn, Fe, Mn, Ni, As (Achazi *et al.*, 1996, Posthuma *et al.*, 1997, Posthuma *et al.*, 1998 y Filiminova *et al.*, 2000).

En el estado de Tabasco, ha habido casos aislados en cuestión del buen manejo de los RSU, desafortunadamente, en algún momento surge el descontrol de los SDF, convirtiéndose en TACA, que promueven el aporte de contaminantes en diferentes fases. El presente estudio tiene como objetivo, el determinar la toxicidad de 5 puntos contaminados con lixiviados en un SDF, a partir de un bioensayo con lombrices *E. foetida*.

## MÉTODO

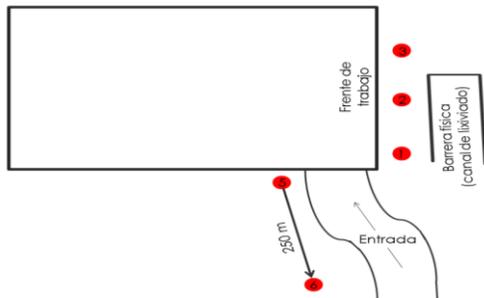
### Ubicación del sitio y puntos de muestreo

El Relleno Sanitario Municipal se encuentra ubicado en el km. 13 de la carretera Villahermosa-Nacajuca, en la R/a. Arroyo Sector San Cipriano, del Municipio de Nacajuca, Tabasco. El Relleno Sanitario se ubica en las coordenadas 92°58'59.99" de longitud oeste y 18°06'42.16" de latitud Norte (Tabla 1).

**Tabla 1. Localización y descripción de los puntos de muestreo**

Puntos de muestreo	Ubicación	Coordenadas	
		Norte	Oeste
1	Frente de trabajo	18°06'52.85"	92°57'18.36"
2	Frente de trabajo	18°06'52.50"	92°57'17.84"
3	Frente de trabajo	18°06'51.67"	92°57'17.08"
4	Sitios posterior a una barrera natural (Canal)	18°06'52.40"	92°57'18.54"
5	Costado del frente de trabajo	18°06'54.38"	92°57'17.45"
6	Testigo (Terreno de pastoreo de ganado a 250 m de distancia)	18°06'59.00"	92°57'23.68"

Con una superficie de 2 ha se determinaron seis puntos de muestreo (PM), en base a recorridos previos al sitios, donde se observó la presencia de lixiviados. Los cuales se presentan en el Tabla 1 y en la Figura 1, se muestra su ubicación.



**Figura 1.** Ubicación de los puntos de muestreo Toma de muestras.

En los PM se realizaron excavaciones de 30 cm de profundidad (NOM-021-SEMARNAT-2000), obteniendo 2 kg de muestra (Figura 2). Se tomaron esos puntos de manera estratégica, con la finalidad de observar algún tipo de toxicidad que puede causar los lixiviados generados por residuos sólidos urbanos.



**Figura 2.** Toma de muestras.

#### Preparación de las muestras

La preparación consistió en secarlas, triturarlas y tamizarlas esto basado en la NOM-021-

SEMARNAT-2000. Por cada punto de muestreo se pesaron 500 g, los cuales se colocaron en charolas de aluminio y se introdujeron a una estufa a 103°C durante 24 h, como establece la NMX-AA-16-1984. Las muestras secas fueron trituradas y tamizadas en malla no. 10.

#### Parámetros fisicoquímicos

Se realizaron mediciones fisicoquímicas al suelo, utilizando 10 g de suelo y diluyéndolo en 90 mL H<sub>2</sub>O destilada, agitando la mezcla durante 10 min y dejando reposar 30 min, hasta obtener el sobrenadante, al cual se le midió el pH, Conductividad eléctrica ((μS/cm) potencial oxido reducción, salinidad y oxígeno disuelto, con un equipo multiparamétrico marca Hanna® modelo 9828. Además se determinaron metales pesados como Cn, Cu, Cr, Fe, Ni, Zn, en un fotómetro marca Hanna® modelo c99.

#### Textura

La textura de un suelo representa su composición granulométrica. Cada término corresponde a una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. Para determinar la textura del suelo, se utilizó el método Bouyoucos. En un vaso Berzelius, de 500 mL, se depositaron 70 mL H<sub>2</sub>O (grado comercial). Se pesaron y agregaron 55 g de suelo. Se agregó y mezcló 20 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, dejando que reaccionara por 10 min. Se colocaron 50 g del suelo en el vaso de una batidora y se agregaron 5 ml de oxalato de sodio, y 5 ml de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Se agregó agua hasta la segunda ranura y se agito durante 10 min. Se vertió en una probeta 1000 mL. La probeta se aforo con agua fría, manteniendo una temperatura de 20 °C. La muestra se agito 1 min y se dejó reposar 40 s. Posteriormente se tomó la primera lectura con un hidrómetro y la temperatura. Se dejó reposar otras 2 h y se tomó la segunda lectura.

Finalmente con las ecuaciones siguientes y el triángulo de textura, se realizó la determinación.

$$\begin{aligned} & \frac{\% \text{ Limos} + \% \text{ Arcillas}}{\text{(primero lectura} \times 100)} \\ & = \frac{g \text{ suelo}}{\% \text{ Arena} = 100 - (\% \text{ Limo} + \% \text{ Arcilla})} \\ & \frac{\% \text{ Arcilla} = \text{(segunda lectura} \times 100)}{g \text{ suelo}} \\ & \% \text{ Limo} = (\% \text{ Limo} + \% \text{ Arcillo}) \\ & \quad - \% \text{ Arcilla} \end{aligned}$$

### Densidad real

Este valor se determinó en base a lo reportado por Valencia (2004). Se colocaron 20 g de suelo seco en un matraz aforado de 100 mL, completamente seco y previamente pesado. Posteriormente se agregó lentamente agua destilada, girándolo y agitando el matraz suavemente para facilitar el desalojo del aire atrapado en el fondo del matraz. Se agitó continuamente el matraz de forma circular evitando la formación de espuma y se añadió agua hasta cerca del cuello del matraz, dejándolo reposar unos minutos hasta que ya no existan burbujas de aire. Se aforo conservando el menisco en el límite de la marca de 100 mL. Se pesó el matraz con la mezcla suelo/agua y posteriormente se vertió todo el contenido del matraz. Finalmente se lavó y seco para pesarlo y restarle el peso del matraz, para obtener todos los pesos que se utilizaron en la siguiente ecuación:

$$D_{real} = \frac{P_s}{P_s + P_{H_2O} - P_{(S+H_2O)}}$$

Donde:

$P_s$  = Peso suelo = 20 g

$P_{H_2O}$  = Peso agua

$P_{(S+H_2O)}$  = Peso de la mezcla (suelo + agua)

### Bioensayo

Para evaluar la calidad del suelo se realizó un bioensayo de evasión subletal (Loureiro *et al.*, 2005), durante 15 días, con tres replicas por cada PM contaminado, obteniendo 15 unidades experimentales (UE), las cuales constaban de recipientes transparentes con tapa (Figura 3). Se utilizaron 250 g de suelo contaminado y 250 g de suelo testigo y finalmente con una barrera natural se dividió físicamente cada suelo. Dentro del surco, se colocaron 10 individuos, con un peso promedio de  $0.232 \pm 0.019$  g. Los puntos 1 al 5 se consideraron suelos contaminados y el punto 6 se consideró suelo testigo o blanco. A cada UE se añadieron 30 g de sustrato que mantendrían con alimento a las lombrices. Previo al ingreso las lombrices fueron lavadas, y promoviendo su excreción, durante 5 horas sin alimento. Se tomaron dos lecturas de evasión, una a los 7 y 15 días.

Para determinar los valores de evasión, se utilizó la siguiente ecuación (Busch *et al.*, 2011; Tammeorg *et al.*, 2014):

$$\% \text{Evasión} = \frac{(n_c - n_T)}{N} * (-100)$$

Donde:

$\% \text{Evasión}$ : Porcentaje de evasión

$n_c$ : Número de individuos encontrados en el suelo control

$n_T$ : Número de individuos encontrados en el suelo contaminado

$N$ : Total de individuos utilizados por cada UE



Figura 3. Unidades experimentales (UE).

**Análisis estadístico**

Se montó un diseño experimental completamente aleatorizado, aplicando un Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95%, utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS® Centurion XV.II.

**RESULTADOS**

**Obtención de muestras**

Las muestras obtenidas (Figura 4) del sitio fueron trasladadas a la planta piloto no. 3 de Tratamiento de aire y residuos sólidos, donde fueron preparadas para sus análisis.

**Mediciones fisicoquímicas**

Los resultados fisicoquímicos de cada punto de muestreo se muestran en el Tabla 2.

**Características físicas del suelo**

En base a las pruebas realizadas de textura, densidad y humedad se determinaron las características, como se muestra en el Tabla 3.

**Metales pesados**

En el Tabla 4 se muestran los valores promedios de la concentración de metales pesados por punto de muestreo.

Con respecto a la NOM-017-SEMARNAT-2004, los puntos 2 y 4 superan los límites máximos permisibles para el aprovechamiento del sitio,

**Bioensayo**

Los resultados del bioensayo para los primeros 7 días se muestran en el Tabla 5.

Los valores obtenidos en la segunda revisión (a los 15 días) se muestran en el Tabla 6. Es posible observar que durante casi todo el bioensayo, el suelo del punto 3 tuvo mayores % evasión.

**Análisis estadístico**

La prueba de Tukey se realizó, como se muestra en la Figura 5.



Figura 4. Muestras obtenidas por cada punto.

Tabla 2. Valores fisicoquímicos de cada punto de muestreo.

Punto de muestreo	pH	Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )	Potencial oxido Reducción (mV)	Salinidad (psu)
1	8.15±0.30	169.33±38.28	49.40±42.584	0.05±0.03
2	8.64±0.10	189.00±62.35	2.87±24.4	0.09±0.03
3	8.79±0.07	245.33±44.54	-20.00±21.52	0.11±0.02
4	8.56±0.10	124.33±43.38	-5.80±13.59	0.06±0.02
5	8.48±0.26	85.67±80.00	-10.33±20.40	0.04±0.04
6	8.41±0.14	95.00±55.74	-1.47±13.58	0.04±0.02

Tabla 3. Características físicas del suelo.

Punto de muestreo	Textura	Humedad (%)	Densidad ( $\text{g ml}^{-1}$ )
1	Arcillo- limoso	27.86	2.41
2	Franco	26.44	2.08
3	Arcillo-limoso	31.54	2.15
4	Franco- arenoso	20.12	2.33
5	Arenoso	17.2	2.44
6	Franco limoso	25.94	2.08

**Tabla 4.** Valores promedio de metales pesados determinados (mg kg<sup>-1</sup>).

Punto de muestreo	Cianuro	Cobre	Cromo VI	Hierro	Níquel	Zinc
1	10±0.173	33.33±0.005	4.67±5.68	97±0.01	FR	40±0.69
2	1.33±0.002	63.33±0.037	4.33±3.785	53.33±0.015	26,667±0.005	83.333±0.14
3	FR †	50±0.017	11±9.64	130±0.02	FR	140±0.24
4	FR	16.67±0.015	FR	536.67±0.030	23,333±0.002	FR
5	0.33±0.0005	20±0.02	13.33±8.02	46.67±0.04	FR	FR
6	0.67±0.001	6.67±0.011	7±6.24	30±0.02	300±0.2	33.33±0.06

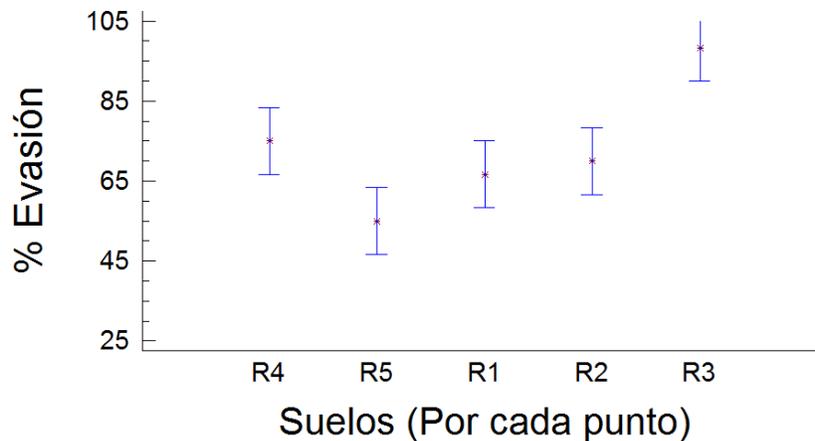
†FR: Fuera de rango

**Tabla 5.** Porcentaje de evasión (7 días).

Tipo de suelo	% Evasión			Media
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	
1	60	70	60	63.33±5.77
2	70	60	40	56.67±15.28
3	100	90	100	96.67±5.77
4	70	60	80	70.00±10.00
5	50	40	20	36.67±15.28

**Tabla 6.** Porcentaje de evasión (15 días).

Tipo de suelo	% Evasión			Media
	Replica 1	Replica 2	Replica 3	
1	70	80	60	70.00±10.00
2	80	80	90	83.33±5.77
3	100	100	100	100.00±0.00
4	80	80	80	80.00±0.00
5	70	70	80	73.33±5.77



**Figura 5.** Análisis estadístico.

Dado que el valor de  $p$  es inferior a 0.05, existen diferencias estadísticamente significativas entre los puntos comparados, con un nivel de confianza del 95.0%, destacando el punto 3, con el mayor % de evasión.

### **DISCUSIÓN**

Los valores de pH, indican un rango de ligera alcalinidad, en cambio los puntos 2,3 y 4 fueron altamente alcalinos, lo que puede provocar una dificultad en el desarrollo de cultivos y una posible clorosis férrica esto de acuerdo a la NOM-021-REC.NAT-2000. Los valores de POR indican para el punto 1 y 2, valores positivos, por lo cual indica que existen reacciones de oxidación; para los puntos 3, 4, 5 y 6, se obtuvieron valores negativos, donde se llevan a cabo reacciones de reducción. Para el caso de los metales pesados, los puntos 2 y 4, presentan concentraciones por encima de la norma. Los resultados de textura, indican que solo el punto 1 y 3, presenta una ligera predominancia arcillosa, lo cual podría

impedir la migración de contaminantes, y por ende, la concentración de estos. Sin embargo en el bioensayo, se muestra que en todos los suelos contaminados, presentaron una evasión > 70%. Esto genera hipótesis a resolver, como el uso de otras técnicas de determinación de metales, la ampliación de puntos de muestreo y las profundidades a monitorear.

### **CONCLUSIÓN**

Los resultados confirman la existencia de ciertos niveles de contaminación, sin embargo en estudios posteriores, es recomendable el uso de técnicas más precisas en la determinación de metales pesados. La implementación de los SDF, como los relenos sanitarios, son buenas tecnologías, sin embargo, el mal diseño, construcción, operación y mantenimiento, además de la falta del monitoreo ambiental, provocan su conversión a Tiraderos a Cielo Abierto.

### **REFERENCIAS**

- Atencio R., Reyes J. y Guevara J. (2013). Evaluación de riesgo ambiental en un tiradero con quema de basura. "Internacional de Contaminación Ambiental" 29: 107-117.
- Busch D., Kammann C., Grünhage L., Muller C. (2011). Simple biotoxicity tests for evaluation of carbonaceous soil additives: establishment and reproducibility off our test procedures. "Environ. Quality" 40: 1–10 pp.
- Cairns J., Pratt J. (1988). Ecotoxicological effect indices: A rapidly evolving system. "Water Sci. Tech." 19: 1–12.
- Cuevas M., Espinosa G., Ilizaliturri C., Mendoza A. (2012). Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos. Instituto Nacional de Ecología. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Natrales. México. 136 p.
- Kasassi A., Rakimbei P., Karagiannidis A., Zabaniotou A., Tsiouvaras K., Nastis A., Tzafeiropoulou K. (2008). Soil contamination by heavy metals: measurements from a closed unlined landfill. "Bioresource Technology" 99: 8578–8584.
- Li D., Hockaday W., Masiello C. y Alvarez P. (2011). Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting. "Soil Biology & Biochemistry" 43: 1732 – 1737.
- Loureiro S., Soares A. y Nogueira A. (2005). Terrestrial avoidance behavior tests as screening tool to assess soil contamination. "Environmental Pollution" 138: 121-131.
- Lukkari T. y Haimi J. (2005). Avoidance of Cu- and Zn-contaminated soil by three ecologically different earthworm species. "Ecotoxicology and Environmental Safety" 62: 35–41.
- Norma Oficial Mexicana 021. (2000). Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. México.

Pastor J., Hernández J. (2012). Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: determinants for restoring their impact. "Journal of environmental management" 95: 42 – 49.

Robles, F. (2008). Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. 2ª edición. revillagigedo 83: 112 p.

Tammeorg P., Parviainen T., Nuutinen V., Simojoki A., Vaara E. y Helenius J. (2014). Effects of biochar on earthworms in arable soil: avoidance test and field trial in boreal loamy sand. "Agriculture, Ecosystems and Environment" 191: 150–157 pp.

Teuben A. y Verhoef H. (1992). Relevance of micro-and mesocosm experiments for studying soil ecosystem processes. "Soil Biol. Biochem" 24: 1179.

Volke T., Velasco J., De la Rosa D. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides. Instituto Nacional de Ecología. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 144 p.

Zairi M., Ferchichi M., Ismail A., Jenayeh M., y Hammami H. (2004). Rehabilitation of yahoudia dumping site, tunisia. "Waste Manage". 24: 1023-1034 pp.

---

Este documento debe citarse como: Sosa-Olivier J.A., Laines-Canepa J.R., Enríquez-Murguía J. F., Molina F., Bautista-Martínez L., Segura-García A. E., Hernández-Alcudia S. E. (2015). **Evaluación de la toxicidad puntual en un sitio de disposición final de residuos municipales.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 110-117, ISSN 1665-529-X.

# Mejora del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos empleando herramientas SIG: un caso de estudio

Juan Antonio Araiza Aguilar <sup>1\*</sup>, Miguel Eduardo José Zambrano

*Fecha de recepción: noviembre de 2014 – Fecha de aprobación: mayo 2015*

## RESUMEN

Una de las causas de la contaminación ambiental en México es el aumento por la generación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Desde los años 50s la producción se ha incrementado en casi 13 veces, pasando de 8,200 a 109,000 t/d. Sin embargo, el eje medular no radica en las grandes cantidades generadas, sino en el trabajo que demanda manipularlas en los ámbitos municipales y estatales. La Recolección es la etapa que más afectaciones pueden llegar a tener. La importancia de dicha etapa radica las erogaciones económicas que se realizan, ya que se estima pueden llegar a representar entre el 50 y 90% de los costos de operación del servicio de limpia. Por lo anteriormente descrito, en el presente documento se realizó la propuesta de mejora del sistema de recolección de los RSU en 2 localidades del municipio de Villaflores (Benito Juárez y Jesús María Garza), Chiapas, empleando datos geográficos en combinación con el análisis espacial basado en un software SIG para lograr la disminución de tiempos en el recorrido, así como en el número total de puntos de toma o esquinas y consumos de combustible. Derivado de este proceso, se aseguró la disminución del número total de contenedores y/o paradas de colecta, pasando de un total de 203 paradas a tan solo 89 en ambas localidades. Así mismo, las cantidades recolectadas de RSU de la situación mejorada pasarán de 6.32 a 37.91 t/d, siendo este tal vez el mayor beneficio por la mejora del sistema de recolección.

**Palabras clave:** ArcGis, contenedor de residuos, recolección de residuos sólidos, residuos sólidos urbanos, sistemas de información geográfica.

## Improvement of solid waste collection service using GIS tools: a case study

### ABSTRACT

One of the causes of environmental pollution in Mexico is the increased generation of Municipal Solid Waste (MSW). Since the 50s production has increased by nearly 13 times, from 8,200 to 109,000 Tons/day. However, the fundamental issue is not the large quantities generated, but rather in the work required in handling municipal and state levels. The collection of MSW is a very important stage. The importance of this step resides the economic cost that are made, as it is estimated could represent between 50 and 90% of the cost of the collection service operation. In this paper was improved the system of collection of MSW in 2 localities of the municipality Villaflores (*Benito Juárez y Jesús María Garza*), Chiapas, using geographic data in combination with the spatial analysis based on GIS software to achieve decrease in the travel times and the total number of stops and fuel consumption. From this process, are reduced the total number of stops from a total of 203 to just 89 at both localities. Also, the quantities collected MSW will increase from 6.32 to 37.91 Tons/day, this being perhaps the greatest benefit by improving the collection system.

**Key Words:** ArcGis, geographic information systems, municipal solid waste, solid waste collection, solid waste collection bins.

---

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.

\*Autor corresponsal: Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Libramiento. Norte. Poniente. s/n. Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 29000. México. Tel.9611768673. Correo electrónico: araiza0010@hotmail.com

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

## **INTRODUCCIÓN**

Una de las causas de la contaminación ambiental en México es el aumento en la generación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), ocasionado por diversos factores, entre los que se encuentra el crecimiento de la población, los cambios en los hábitos de consumo, la migración o las nuevas costumbres, así como el manejo deficiente de estos residuos por parte de los organismos encargados y de la misma sociedad (Buenrostro y Bocco, 2003; Ojeda y Beraud, 2003).

Se sabe que en la década de los 50s, la generación diaria promedio nacional de RSU era de 8,200 t/d (Hernández *et al.*, 2004), misma que aumento a más de 109,000 t/d para el año 2010 (SEMARNAT, 2014). Lo anterior significa que en seis décadas la producción se incrementó en casi 13 veces, sin embargo, el eje medular del asunto no solo radica en las grandes cantidades generadas, sino en el trabajo que demanda manipular estas cantidades sobre todo en los ámbitos municipales y estatales.

Tavares *et al.* (2008), indican que una de las estrategias que deben de emplearse para minimizar el riesgo al medio ambiente y mejorar la calidad de vida de los centros urbanos, es la del llamado Manejo Integral de los Residuos Sólidos (MIRS), que comprende una serie de acciones asociadas para manipular a los residuos desde su generación hasta su disposición final, incluyendo operaciones intermedias, y donde la etapa o acción que cobra mayor importancia es la recolección.

La recolección consiste en transportar los RSU desde su almacenamiento en la fuente generadora, hasta el vehículo recolector y luego trasladarlos hasta el sitio de disposición final o a la estación de transferencia (SEDESOL, 1997). La importancia de dicha etapa radica las erogaciones económicas que se realizan, ya que se estima pueden llegar a representar entre el 50 y 90% de los costos de operación del servicio de limpia, con montos que pueden ir desde los \$130.00 hasta incluso por encima de los \$1000.00 por tonelada, dependiendo principalmente de la densidad de población, la cantidad colectada, el estado físico de los camiones, el diseño de las rutas de recolección y diversos gastos de reposición incluidos (SEDESOL, 1996; OPS, 2002; INECC, 2012).

Cifras de 2012 del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), reportan que en México existe un rezago en la etapa de recolección de residuos, ya que tan solo se tiene una cobertura nacional promedio del 83.93%, la cual ha disminuido si se compara con la reportada por la Organización

Panamericana de la Salud (OPS) en 2002 del 86.00%. Así mismo, se indica que la situación tiende a agravarse conforme disminuye el grado de urbanización de las localidades, debido a que en aquellas menores a los 10 mil habitantes, la cobertura de recolección puede llegar a ser de hasta 23.43% (OPS, 2002; INECC, 2012).

En este contexto, los expertos de hoy en día aprovechando el uso extensivo de las bases de datos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), plantean nuevas soluciones al reto de diseñar rutas de recolección de residuos, ya que se ha visto que uno de los principales problemas recae en el mal diseño basado en la experiencia o juicio del proyectista; pues en la mayoría de los casos del contexto nacional, quien diseña las rutas de recolección es el jefe de limpia o los choferes de los vehículos recolectores, los cuales pueden sesgar el ruteo.

Ejemplos documentados de las aplicaciones SIG en varias de las etapas del MIRS las detalla Chalkias y Lasaridi (2011). Específicamente para la etapa de recolección, Santos y Rodrigues (2003), Ghose *et al.* (2006), Gutiérrez (2008), Tavares *et al.* (2008), Chalkias y Lasaridi (2009), han realizado trabajos relevantes, optimizando no solo las rutas de recolección mediante algoritmos específicos, sino también disminuyendo la cantidad de contenedores empleados, hasta incluso modelando el consumo de combustible tomando en cuenta las pendientes o elevaciones de una ciudad y la carga del vehículo recolector.

Dado lo anterior, en el presente documento se plantea realizar la mejora del sistema de recolección de RSU de las localidades de Benito Juárez y Jesús María Garza del municipio Villaflores, Chiapas, empleando herramientas SIG, mejorando con ello el servicio de limpia de las localidades y disminuyendo la proliferación de tiraderos clandestinos, además, se espera que el presente documento sirva de guía y pueda replicarse en otras localidades cercanas.

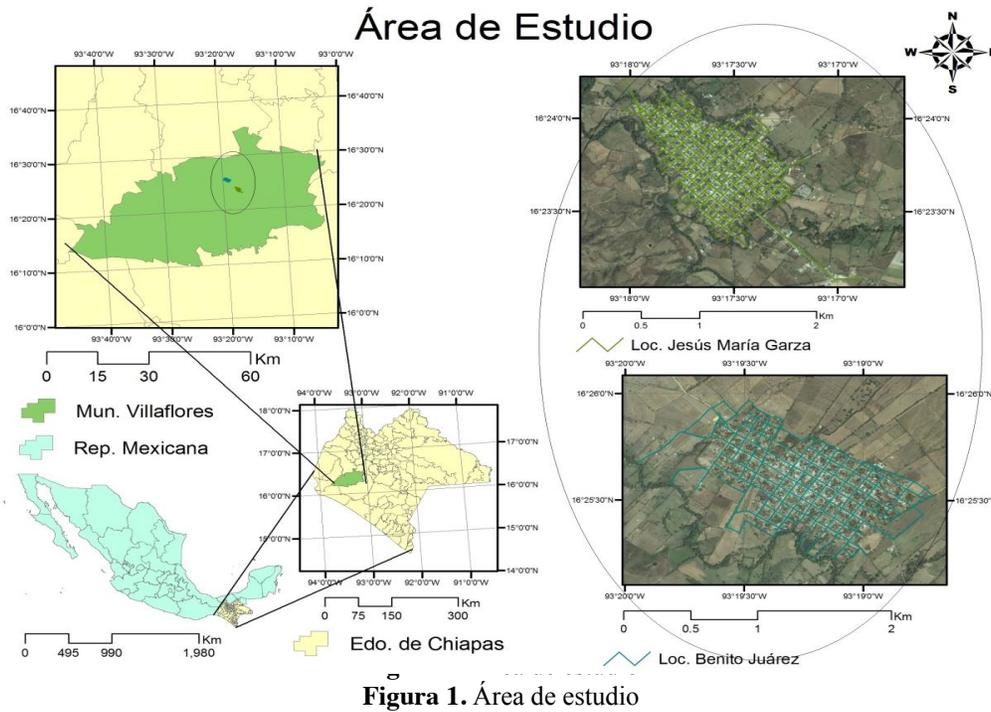
### **Descripción del área de estudio y manejo de residuos sólidos**

Las localidades de Benito Juárez y Jesús María Garza pertenecientes al municipio Villaflores, Chiapas, fueron seleccionadas como casos de estudio. Ambas se ubican sobre la parte norte del municipio, en las coordenadas Lat: 16°25'30.63"N, Long: 93°19'12.94"O y Lat: 16°23'41.64"N, Long: 93°17'32.93"O respectivamente (Figura 1); a una distancia aproximada de entre 28 y 31 km respecto de la cabecera municipal.

Las referidas localidades además de compartir la vía de comunicación principal hacia la cabecera municipal y ser dos de las siete localidades urbanas con las que cuenta el municipio, tienen una estrecha relación debido al vínculo comercial por la venta de productos lácteos, agricultura y otros subproductos. En la actualidad ambas localidades se estima generan 6.32 t/d de RSU, sin embargo, debido a que la frecuencia de recolección es de 1/7 y los días de colecta son los sábados en Benito Juárez y domingos en Jesús María Garza, la cantidad a recolectar puede llegar a ser de hasta 15 t/semana (5 toneladas en Benito Juárez y 10 toneladas en Jesús María Garza).

Las referidas toneladas están siendo colectadas mediante un camión de 20 Yd<sup>3</sup> enviado por el departamento de obras públicas del municipio de Villaflores, el cual solo realiza una sola vuelta por día de servicio para cada localidad, con lo cual en muchas ocasiones los residuos son quemados o depositados en barrancas, en lugar de ser llevados al Sitio de Disposición Final (SDF) más cercano (ver Figura 2).

La información a detalle sobre el proceso de recolección se muestra en la Tabla 1.



**Figura 2. Quema de residuos en área de estudio y depósito en lugares no apropiados**

**Tabla 1.** Datos del proceso de recolección de RSU

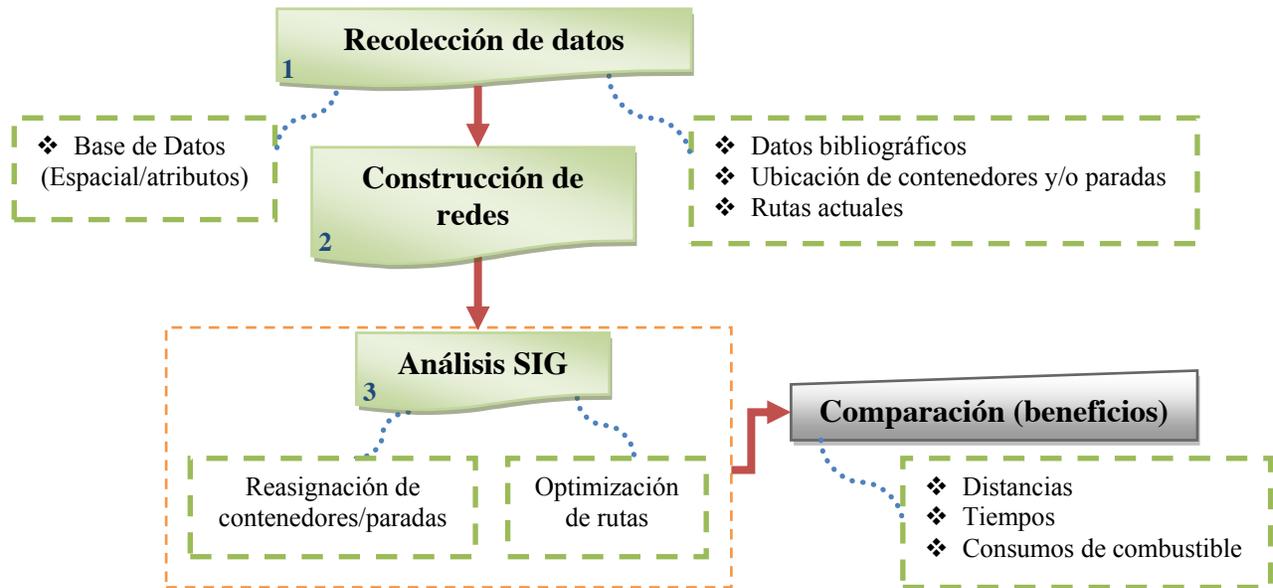
Localidad	Cantidad generada de RSU (t/d)	Población atendida (hab)	Fuentes de generación	No. de paradas	Frecuencia de recolección	Tiempo de colecta (min)	Distancia al SDF (km)
Benito Juárez	2.17	3,746	Domicilios y	57	1/7	192	33
Jesús María Garza	4.15	7,179	comercios	146	1/7	306	28

*Nota:* las cifras de RSU y población están calculadas al año 2014 y fueron obtenidas mediante proyecciones realizadas con el método geométrico, empleando una tasa de generación per-cápita urbana de 0.428 kg/hab-d y una tasa de crecimiento de población de 1.23% para Benito Juárez y 1.65% para Jesús María Garza.

**METODOLOGÍA**

En el presente trabajo se emplearon a los SIG para optimizar rutas de recolección de RSU, reduciendo al mínimo el consumo de combustible y aminorando los tiempos y distancias recorridas. La herramienta de análisis principal fue Network Analyst de ArcGis, la cual usa el algoritmo de Dijkstra para buscar las trayectorias más cortas (ESRI, 2014). La metodología comprende 3 fases que se exponen a continuación (Figura 3):

**Recolección de datos:** Esta fase consistió en la adquisición de la traza urbana y vialidades en formato digital, para lo cual se recurrió al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Por otro lado, mediante las visitas a campo y las entrevistas con el personal que opera el sistema de recolección, se obtuvo la descripción de las rutas actuales, así como el número de paradas o esquinas. La tabla 2 muestra la información recopilada.



**Figura 3.** Metodología empleada

**Tabla 2.** Base de datos espacial recopilada

Dato espacial	Tipo	Geometría
Red vial de calles y carreteras de las localidades	Vectorial	Poli línea
Ubicación espacial de paradas o contenedores	Vectorial	Punto
Traza urbana de localidades	Vectorial	Polígono
Rutas de recolección existentes	Vectorial	Poli línea
Atributos de red y restricciones	Tabular	N/A
Datos de población y generación de RSU	Tabular	N/A

**Construcción de redes:** La fase consistió generar las redes de transporte para las localidades ya citadas, lo anterior mediante la acción de New Network Dataset de Network Analyst en ArcGis. Cabe mencionar que antes de generar el Network Dataset, se modificaron o acondicionaron los atributos a la red vial, tales como tiempos, distancias, velocidades y consumos de combustibles (ver Figura 4).

**Análisis SIG:** En esta última fase de la metodología se realizaron una serie de acciones encaminadas a comparar los beneficios que se tendrían con las nuevas rutas de recolección. Las acciones realizadas en esta fase fueron las siguientes:

**Reasignación de paradas:** Como ya se describió en la Tabla 1, en la actualidad se tienen distribuidas por las localidades un cierto número de paradas o puntos de toma (57 en Benito Juárez y 146 en Jesús María Garza), las cuales no necesariamente son las mejores, pues hay casos en los que el vehículo recolector se detiene únicamente por unas cuantas bolsas de residuos, lo que ocasiona pérdidas en demasía de tiempos.

Es de importancia comentar que debido a que las localidades son pequeñas (aunque urbanas según INEGI), muchos de los aspectos manejados en el diseño de rutas de recolección como los sentidos de las calles y el macro-ruteo por ejemplo, no se consideraron al 100%, haciendo un poco más fácil la mejora de rutas, pues solo se trabajó con el micro-ruteo.

Este proceso de reasignación de paradas se realizó tomando en cuenta un horizonte de planeación de 10

años, el método de recolección de parada fija/esquina mediante contenedores de gran tamaño, calles pavimentadas y la generación per-cápita de RSU, así como ciertos factores necesarios de acuerdo a la Ecuación empírica 1.

$$N = W_p \times D / (V \times \rho \times \epsilon) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde “N” es el número de contenedores, puntos de toma o esquinas, “W<sub>p</sub>” es la cantidad promedio generada (al horizonte de planeación) en kg/d de RSU, “D” es el número de días de generación por semana (6 d/semana), “V” es el volumen en m<sup>3</sup> del contenedor propuesto (5m<sup>3</sup>), “ρ” es la densidad de los RSU (120 kg/m<sup>3</sup>) y “ε” es el coeficiente de llenado (0.80).

**Análisis o generación de rutas nuevas:** Posterior a la reasignación de paradas tocó el turno a la modelación o generación de rutas optimizadas. Siguiendo la metodología planteada por Chalkias y Lasaridi (2011), se empleó ArcGis en su versión 10.1, específicamente el módulo de Network Analyst, quien hace uso del algoritmo de Dijkstra clásico para resolver el problema de la trayectoria más corta en un gráfico sin dirección, no negativo y ponderado, para emplearse dentro del contexto de los datos de transporte del mundo real. Cabe resaltar que este algoritmo dentro de ArcGis se ha modificado para respetar las configuraciones del usuario tales como restricciones unidireccionales, restricciones de giro, barreras y restricciones de lado de calle, tratando de minimizar el atributo de costo especificado por el usuario (ESRI, 2014).

FID	Shape	FID_	Meters	Minutes	Oneway	FT_Minutes	TF_Minutes	Hierarchy	Desc_Hierc	Vel_km_x_h
115	Polyline	116	95.065845	0.190132	Ambos Sentidos	0.190132	0.190132	3	Calle secundaria	30
116	Polyline	117	95.13811	0.190276	Ambos Sentidos	0.190276	0.190276	3	Calle secundaria	30
117	Polyline	118	101.921238	0.203842	Ambos Sentidos	0.203842	0.203842	3	Calle secundaria	30
118	Polyline	119	7.215864	0.014432	Ambos Sentidos	0.014432	0.014432	3	Calle secundaria	30
119	Polyline	120	278.268144	0.417402	Ambos Sentidos	0.417402	0.417402	2	Calle primaria	40
120	Polyline	121	313.151509	0.626303	Ambos Sentidos	0.626303	0.626303	3	Calle secundaria	30
121	Polyline	122	106.997422	0.213995	Ambos Sentidos	0.213995	0.213995	3	Calle secundaria	30
122	Polyline	123	101.129756	0.151695	Ambos Sentidos	0.151695	0.151695	2	Calle primaria	40
123	Polyline	124	102.602204	0.153903	Ambos Sentidos	0.153903	0.153903	2	Calle primaria	40
124	Polyline	125	94.271659	0.141407	Ambos Sentidos	0.141407	0.141407	2	Calle primaria	40
125	Polyline	126	100.51144	0.201144	Ambos Sentidos	0.201144	0.201144	2	Calle primaria	40

Figura 4. Modificación de atributos de red.

Reasignación de paradas/puntos de toma

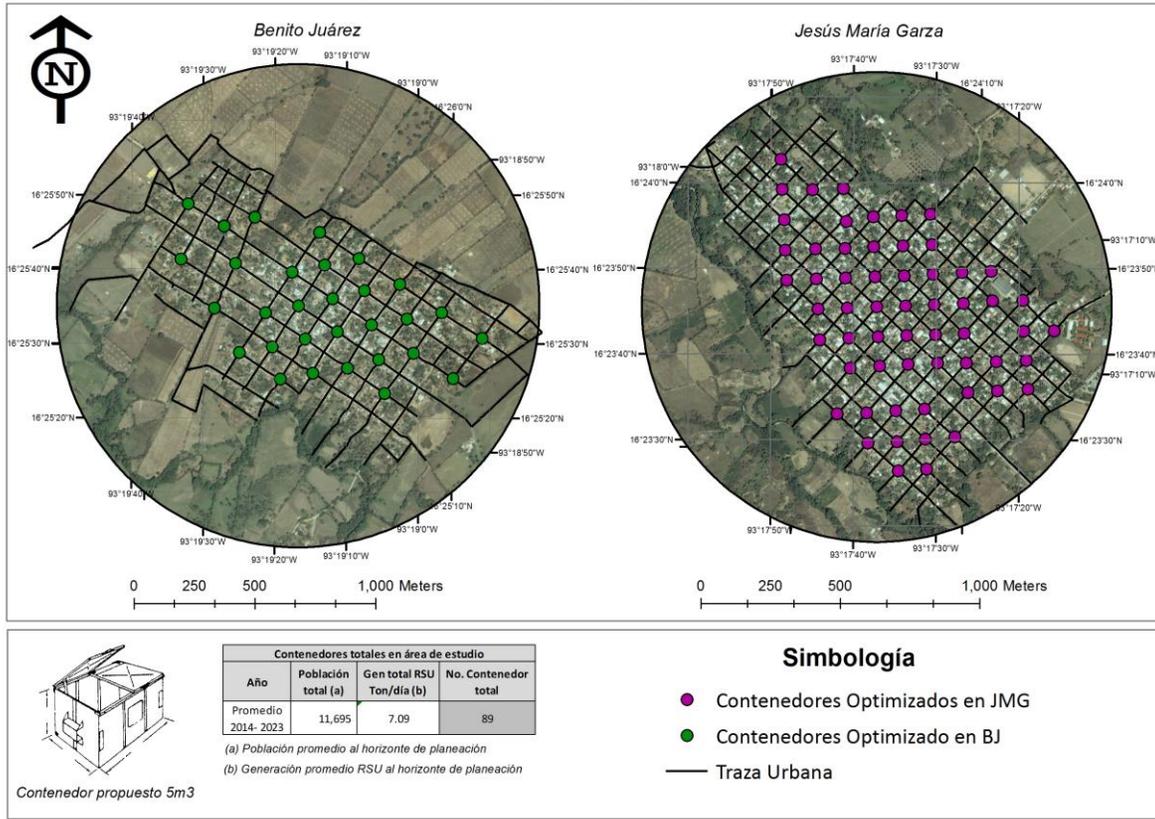


Figura 5. Reasignación de paradas dentro de la red.

Una de las opciones más del software es poder reordenar las paradas para encontrar las rutas óptimas, pudiendo tener 2 posibles variantes: i) reordenar todas las paradas y obtener la ruta óptima o ii) respetar el origen y el destino, reordenando solo las paradas intermedias. Es de notarse que al seleccionar esta última opción, el análisis ya no se considera un problema de la ruta más corta y pasa a considerarse un problema de agente viajero. La opción específica de ruteo empleada en el ambiente de ArcGis fue “New Vehicle Routing Problem”.

**Comparación de tiempos, distancias y consumos de combustible:** En esta última parte correspondiente al análisis SIG, se compararon la situación actual versus la situación con rutas mejoradas, específicamente en relación a las distancias recorridas, los tiempos ocupados en la colecta de residuos y el consumo de combustible.

Cabe recalcar que para realizar el proceso de mejora de rutas, no fue posible emplear una frecuencia de recolección mayor a 1/7, debido a la no existencia de mayor cantidad de vehículos como para aumentar

dicha frecuencia sin afectar la recolección de otras localidades o a la propia cabecera municipal. En relación a la comparación de consumos de combustible, decidió emplearse una función lineal simple basada en las distancias de recorrido, considerando un rendimiento de combustible de 3.5 km/L para un camión tipo de 20 Yd<sup>3</sup>.

**RESULTADOS**

Los resultados del presente estudio muestran la importancia de mejorar el ruteo, pues se aprecia en la tabla 3 que gran parte de los criterios de análisis resultan favorables para la situación mejorada.

Respecto a los puntos de toma, los resultados exhiben que tener mayor cantidad de esquinas a recolectar no es siempre la mejor opción, ya que también pueden presentarse pérdidas de tiempo en demasía. Con la propuesta de puntos de toma que incluye la introducción de contenedores de mayor capacidad y ubicados en lugares estratégicos, se asegura la disminución del número total de contenedores y/o paradas de colecta, pasando de un total de 203 paradas a tan solo 89 en ambas localidades.

**Tabla 3.** Resultados del proceso de mejora de las rutas de recolección

Aspectos de Ruta	Actual		Mejorada	
	B. Juárez	J.M. Garza	B. Juárez	J.M. Garza
Tiempo de recolección en ruta (min/semana-ruta)	192	306	237.17*	212.97*
Distancia recorrida en ruta (km/semana-ruta)	68.50	74.11	69.93*	59.97*
Consumos de combustible en ruta (L/semana)	19.57	21.17	19.97*	17.13*
Tiempos de colecta en punto de toma (min/pto)	2.00	2.00	8.50	8.50
No. de paradas/puntos de toma (No.)	57.00	146.00	30.00	59.00
Frecuencia de recolección (días/semana)	1/7	1/7	1/7	1/7
Número de vueltas por día (Vueltas/d)	1.00	1.00	2.00	4.00
No. De contenedor por vuelta (contenedor/vuelta)	N/A	N/A	15.00	15.00
Cantidad de RSU colectados (Ton/semana)	5.00	10.00	13.00 *	24.91 *
Cobertura de recolección (%)	32.92	34.42	85.58	85.75

*Nota: las comparaciones fueron hechas teniendo en cuenta una semana como intervalo de tiempo pues la frecuencia de recolección es de 1/7, la cual se mantuvo para la situación mejorada, debido a la imposibilidad de cambiarla.*

*- Los valores mostrados con asteriscos son promedios, ya sea del número de vueltas de la situación mejorada (para tiempos y distancias) o promedio de 10 años para la cantidad de RSU recolectada.*

Un dato a señalar es que con la propuesta de mejora fue necesario aumentar el número de vueltas/día en la colecta de residuos, pasando de 1 a 2 en Benito Juárez y de 1 a 4 en Jesús María Garza, lo que trajo consigo modificaciones en los tiempos respecto de la situación actual, siendo de 45 min/semana-ruta el aumento en Benito Juárez y una disminución de 93 min/semana-ruta para Jesús María Garza. Lo anterior, al comparar el tiempo promedio de una vuelta de la situación mejorada, contra el tiempo empleado en la situación actual.

Otros datos de interés generados en el estudio realizado y mostrados en la figura 6, son los tiempos empleados en la modelación, los cuales pueden ser útiles cuando se replique este tipo de estudio; ejemplo de ello son los tiempos muertos establecidos (35 min), que corresponden a carga de combustibles (10 min.) y alimentación de choferes (25 min); tiempos por punto de colecta o esquina, en donde se consideraron 8.5 minutos de vaciado por contenedor (contenedores de 5m<sup>3</sup>), haciendo un total de 127.5 minutos en los 15 contenedores asignados en cada vuelta (a excepción de una vuelta, en la que se colectan 14 contenedores). Así mismo se consideraron 15 minutos de tiempo de descarga de residuos en el SDF.

Por su parte respecto a las velocidades empleadas en el transporte y recolección, éstas variaron dependiendo del tipo de vialidad existente, siendo la asignación de 60 km/h para carreteras y 25 km/h para vías primarias y secundarias. Cabe recalcar que en un estudio de ruteo usualmente deberá de realizarse un

análisis de las vías encontradas en cada localidad, pues no siempre pueden ser consideradas las encontradas bibliográficamente o en estudios similares.

Puntualizando sobre las cantidades recolectadas, estas pasarán de un aproximado de 15.00 t/semana en la situación actual, a 37.91 t/semana en promedio para la situación mejorada, siendo este talvez el mayor beneficio que se tendrá con la mejora del sistema de recolección. Por otro lado, el consumo de combustible disminuirá por cada vuelta realizada en un 23.58% en Jesús María Garza, pues pasará de 21.17 L/semana a 17.13 L/semana; por su parte para Benito Juárez habrá un pequeño aumento del 2.08%, al pasar de 19.57 L/semana a 19.97 L/semana, esto derivado de una mayor cantidad de km recorridos por vuelta para dicha localidad.

Se recalca nuevamente que en las comparaciones anteriores se está empleando un promedio del número de vueltas para la situación mejorada, versus la única vuelta de recolección en la situación actual.

Además de las cifras anteriormente expuestas, en la figura 6 se detallan los tiempos y distancias de cada una de las vueltas que surgieron en el diseño de la propuesta de mejora, los cuales como bien se mencionó, pueden servir de guía cuando se replique este tipo de estudio.

Las rutas de recolección generadas se muestran en la figura 7.

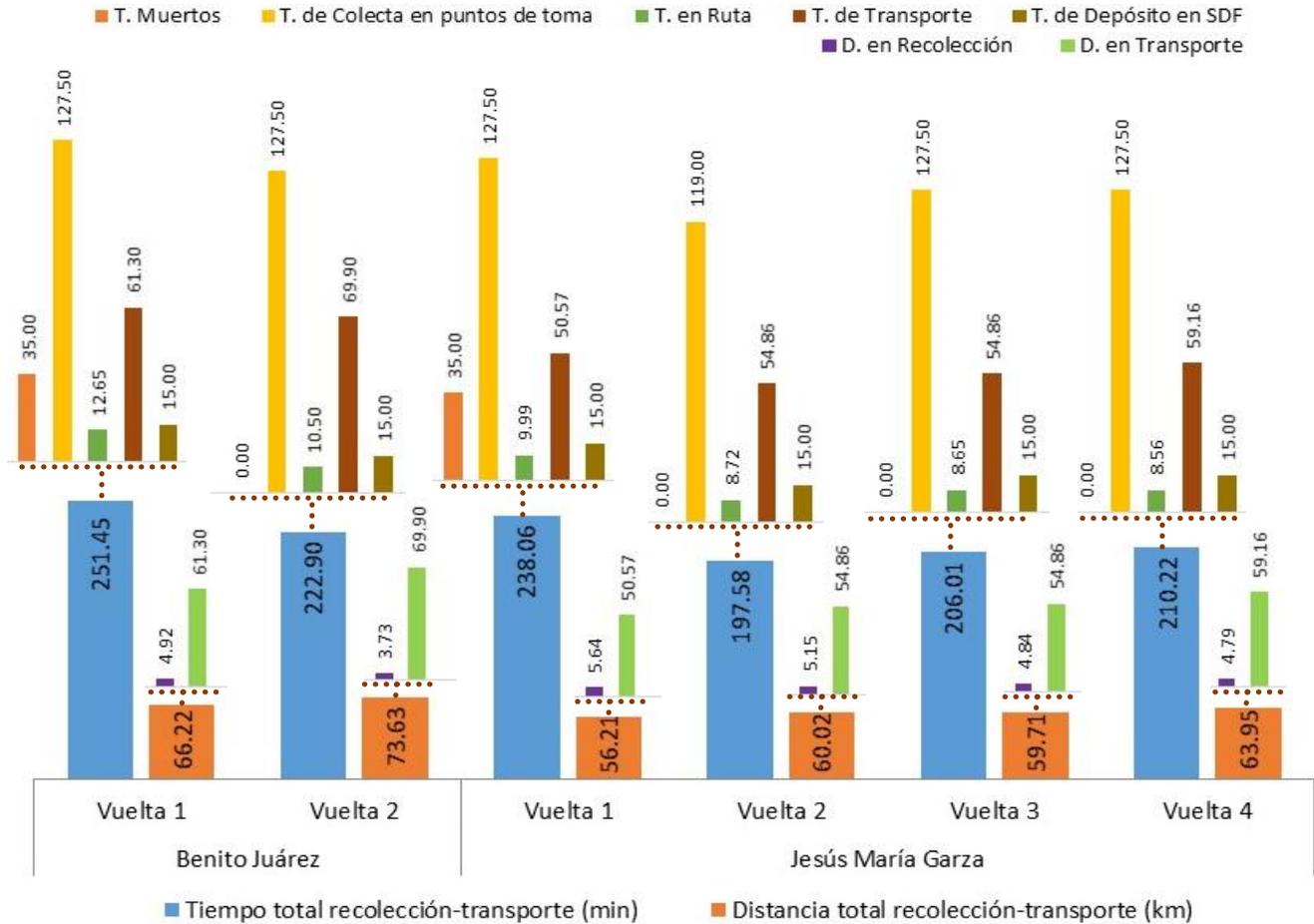


Figura 6. Tiempos y distancias de recorrido por vuelta de recolección en la situación mejorada

**CONCLUSIONES**

El objetivo principal de este trabajo fue la mejora del sistema de recolección de los RSU en 2 localidades del municipio de Villaflores, Chiapas; ya que un mal diseño en el macro y micro-ruteo puede traer consigo graves daños al sistema de colecta, desde desperdicios de tiempo del equipo y personal, reducción en la cobertura del servicio, incremento de los costos, hasta la proliferación de tiraderos a cielo abierto en diferentes puntos de las localidades.

El método propuesto empleó datos geográficos (red de calles y carreteras, la ubicación de los puntos de toma/esquinas o contenedores) en combinación con el análisis espacial basado en un software SIG para la lograr la disminución de tiempos en el recorrido, así como en el número total de puntos de toma o esquinas y consumos de combustible.

Cabe recalcar que de momento en el análisis efectuado se consideró únicamente el equipamiento existente a nivel local (un solo camión recolector además de una frecuencia de recolección de 1/7),

quedando para trabajos futuros el posible uso de equipos no convencionales de recolección (vehículos motorizados por ejemplo), tal y como se ha expuesto en Aquino *et al.*, (1988) y Velásquez R., (2013, 25 de abril).

Respecto a la tecnología SIG, si bien es cierto es un recurso costoso para localidades pequeñas (de menos de 2,500 habitantes) que se encuentren alejadas de centros urbanos de gran tamaño, si ofrece grandes bondades optimizando las rutas de recolección para localidades de más de 2,500 habitantes, ya que minimiza tiempos de cálculo a la vez que evita el sesgo que el ser humano introduce al moldear las rutas a su conveniencia.

No obstante los beneficios que dicha herramienta trae consigo, siempre será necesaria la participación comunitaria en proyectos de esta naturaleza, ya que por ejemplo no sería posible implementar un sistema de contenedores de gran volumen, sin antes hacer conciencia en la población para que el depósito de sus residuos se realice en cada uno de estos recipientes considerados.

## Mejora de Rutas de Recolección

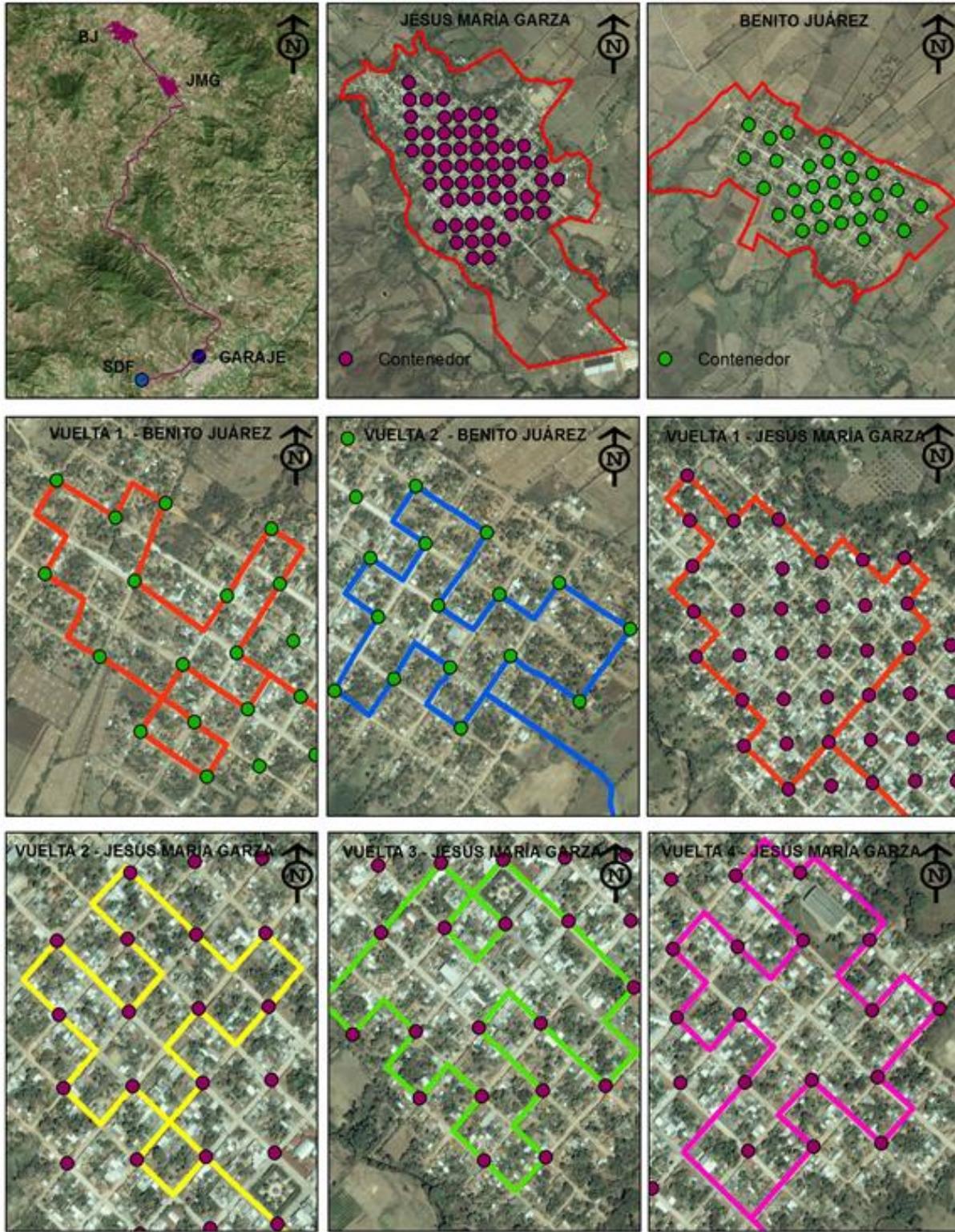


Figura 7. Micro-ruteo en las localidades de estudio

## **BIBLIOGRAFIA**

Aquino, R., Coasaca, J., Alegre, M., Zepeda, F., (1988). Proyecto piloto de recolección de residuos sólidos con métodos no convencionales. Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente, CEPIS, Hojas de divulgación técnica; 44: pp. 1-13.

Buenrostro, O., Bocco, G., (2003). Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. *Resources Conservation and Recycling* 39, pp. 251–263.

Chalkias, C. y Lasaridi, K. (2009). A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: The case study of Nikea, Athens, Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Vol. 5, No. 10, pp. 640-650, ISSN 1790-5079

Chalkias, C. y Lasaridi, K. (2011). Benefits from GIS Based Modelling for Municipal Solid Waste Management, *Integrated Waste Management - Volume I*, Mr. Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-307-469-6, InTech, DOI: 10.5772/17087. Available from: <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-i/benefits-from-gis-based-modelling-for-municipal-solid-waste-management>

ESRI (2014). Algoritmos utilizados por Network Analyst. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//004700000053000000>. [Consultado el 10 de junio de 2014].

Ghose M.K., Dikshit A.K., Sharma S.K. (2006). A GIS based transportation model for solid waste disposal – a case study of Asansol Municipality, *Waste Management*, Vol.26, pp. 1287-1293.

Gutiérrez, F. (2008). Análisis del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando sistemas de información geográfica (SIG). Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Hernández, C., Wehenpohl, G., Heredia, P., de Buen, B. (2004). Guía de Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003. SEMARNAT-GTZ, México, D.F. pp. 57

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. INECC-SEMARNAT, México, D.F. pp 201

Ojeda-Benítez S, Beraud-Lozano JL. (2003). The municipal solid waste cycle in Mexico: final disposal. *Resources Conservation and Recycling*; 39 (3): pp. 239–250

Organización Panamericana de la Salud, OPS (2002). Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales. Informe analítico de México / Evaluación del año 2002. pp. 38.

Santos, L.A., Rodrigues, J.C., (2003). Implementação em SIG de uma heurística para o estudo da recolha da resíduos sólidos urbanos (GIS implementation of a heuristics for the study of MSW collection). Research Report No. 6/2003. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC) Coimbra, Portugal.

Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL, s.f. Aspectos Sociales. México.

--- (1996). Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. pp. 139

--- (1997). Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales. pp. 50

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2014). Estadísticas Ambientales en Materia de Residuos Sólidos Urbanos. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/estadisticas-ambientales>. [Consultado el 10 de junio de 2014].

Tavares G., Zsigraiova Z., Semiao V., Carvalho M., (2008). A case study of fuel saving through optimization of MSW transportation routes, *Management of Environmental Quality*, Vol.19, No.4, pp. 444-454.

Tavares G., Zsigraiova Z., Semiao V., Carvalho M., (2008). Optimisation of the MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modeling, *Waste Management*, vol. 29, pp. 1176–1185, Oct. 2008.

Velásquez R., (2013, 25 de abril). “Soledad pasa de la fuerza del caballo a los caballos de fuerza”. El Sol de San Luis. Disponible en: <<http://www.oem.com.mx/elsoldesanluis/notas/n2961541.htm>> [Consultado el 18 de enero de 2014].

---

Este documento debe citarse como: Araiza Aguilar J. A., Zambrano M. E. J. (2015). **Mejora del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos empleando herramientas SIG: un caso de estudio**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 118-128, ISSN 1665-529-X.

# La importancia del control de la contaminación por ruido en las ciudades

Martha G. Orozco Medina<sup>1</sup>, Alice Elizabeth González<sup>2</sup>

*Fecha de recepción: noviembre de 2012 – Fecha de aprobación: febrero 2015*

## RESUMEN:

La importancia de la contaminación por ruido en las ciudades, radica en sus connotaciones como determinante de la calidad de vida de sus habitantes, dado los efectos que tiene para la salud y el bienestar de las personas. Avanzar en la regulación normativa, formular proyectos de investigación para conocer a mayor detalle los efectos por exposición a altos niveles de ruido y divulgar los resultados para crear conciencia del valor de construir ciudades acústicamente más saludables, es un reto que se debe asumir por parte de las autoridades y los sectores sociales.

**Palabras clave:** ruido, contaminación, salud, ciudades, gestión.

# The importance of the control of noise pollution in the cities

## ABSTRACT:

The importance of noise pollution in cities, is based on its impact as a determinant of the quality of life of its population related to the potential adverse effects on health and well being of people. Advancing normative regulation, formulate research projects to meet more fully the effects of exposure to high noise levels, and disseminate the results to raise awareness of the value of building healthier cities acoustically, is a challenge that must be undertaken by authorities and social sectors.

**Key words:** noise, pollution, health, cities, management.

---

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Ambientales. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA). Universidad de Guadalajara. Km 15 ½ Carretera a Nogales, las Agujas Zapopan, Jalisco, México. C.P.45110.  
Correo electrónico: mgeorozco@gmail.com.mx

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Ambiental (IMFIA). Facultad de Ingeniería. Universidad de la Republica.

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

## **INTRODUCCIÓN**

Reconocer la importancia del diagnóstico de ruido en las ciudades se considera por demás significativo, particularmente por las implicaciones que tiene su presencia en la calidad de vida, salud y bienestar de las personas y las comunidades. El ruido se ha considerado históricamente como un factor ambiental que puede causar molestia a las personas, pero recién en 2011 la Organización Mundial de la Salud ha colocado las molestias causadas por el ruido como el principal efecto adverso sobre la salud humana (WHO, 2011).

Esa contundente afirmación ha sido tan tardía, quizá porque el ruido es demasiado fácil de emitir, o porque no deja rastros perceptibles en el ambiente cuando cesa su emisión, o porque durante muchos años se lo asociaba con “un mal del progreso” desconociendo que las primeras normas de ordenamiento urbano surgieron por problemas de ruido 600 años A.C., (González, 2012) o por un poco de todo ello, es que el control y combate contra el ruido ambiental difícilmente alcanzan un lugar prioritario en las agendas ambientales de los países latinoamericanos.

En consecuencia, su monitoreo no ha sido una constante en la mayoría de las ciudades latinoamericanas, o al menos no como parte de los programas oficiales. Las dificultades que representa considerar al ruido como parte de un estudio de contaminación urbana se deben particularmente a lo complejo y subjetivo de las molestias por exposición, pero también a que culturalmente se ha asumido la exposición a ciertos ruidos como un hábito y erradicar ciertas costumbres en la población, requiere de algo más que de los sonómetros, o el uso de materiales acústicos y el esquema normativo para su control. Los acelerados cambios socioculturales acercan a edades cada vez más tempranas a los niños a las fuentes de ruido, la cultura de la inmediatez, sustituye a la melodía por el ritmo y parece mucho más atractivo tener sonidos de alto volumen que de mejor calidad.

La tecnología para el monitoreo del ruido, su intensidad, frecuencia y variabilidad, también han avanzado notablemente. Aún así, en lo general, no se ha logrado despertar el interés genuino en las autoridades, de modo de unir esfuerzos con el sector académico, industrial, de la construcción, y con la sociedad en general, para hacer frente a la necesidad de considerar la contaminación por ruido en las ciudades como una prioridad y a partir de ese compromiso avanzar hacia la construcción de entornos acústicos más saludables.

El objetivo con el que se desarrolla éste abordaje, es reflexionar y discutir algunas de las características que tiene la calidad acústica en las ciudades, lo que requiere, reunir lineamientos de varias disciplinas y sugerir algunos de los ejes que permitan optimizar estrategias en la gestión del ruido urbano.

## **Generalidades**

Desde que en 1969 la Organización mundial de la Salud reconoció la importancia del ruido como contaminante, han sido insuficientes los esfuerzos para diagnosticar la situación en relación a este agente en varias de las capitales de Latinoamérica y en la mayoría de las grandes ciudades en México, en particular si se compara con otras formas de contaminación. Por ejemplo, para conocer en tiempo real la calidad del aire se cuenta con redes de monitoreo atmosférico que caracterizan los denominados contaminantes criterio (SEMARNAT 2008), o bien el estudio de la presencia de agentes físico químicos y biológicos en el agua ocupa un comprometido esfuerzo de las autoridades y se destina una significativa cantidad de recursos humanos, técnicos y económicos para su continuo análisis, control y monitoreo. Sin embargo, el ruido forma parte integral de los estudios de contaminación atmosférica, aún cuando es por lo general un factor asociado a las mismas fuentes de emisión de gases y partículas.

Es importante hacer mención, de lo significativo que resulta el ruido en las ciudades como indicador de calidad ambiental, puesto que los niveles que se registran dan cuenta de diferentes aspectos como: las condiciones críticas de tráfico, la concentración de actividades y la deficiencia vial, e incluso de la ausencia de espacios abiertos como parques y áreas verdes, también se hacen evidentes limitantes en la calidad acústica de los materiales con que se construyen casas y edificios, hasta la restringida planificación u ordenamiento ecológico o territorial de las localidades.

## **Exposición a ruido en las ciudades**

La contaminación acústica es innegablemente un factor ambiental determinante de la calidad de vida de los habitantes. Puede generar conflictos de uso, afectaciones a la salud y consecuencias económicas de importancia. Está relacionada principalmente con las actividades humanas y se genera a partir de fuentes tan diversas como el transporte, la construcción, la actividad industrial, comercial y de servicios, las sirenas y alarmas o las actividades recreativas; también se emite por la propia concentración de las personas en sus actividades comunitarias, escolares, laborales y festivas, las

cuales derivan en lo que se designa como “contaminación acústica urbana” (Orozco 2008a).

Las formas de exposición a ruido suelen clasificarse según la ocasión en que ocurre y la intencionalidad del sujeto de exponerse o no:

- Ocupacional; ocurre en ocasión y ambiente de trabajo
- Social, voluntaria cuando se asiste a lugares ruidosos o por el uso de aparatos de música, televisión, video o videojuegos a alto volumen.
- Ambiental, aquella que es involuntaria pero está presente en el entorno en el que se mueve el individuo, ruido de calle, de tráfico, de electrodomésticos, de industria, comercio, escuelas, publicidad, mascotas, etc. (González 2012).

Instancias internacionales reconocen, que el exceso de ruido produce efectos nocivos sobre la salud, además de efectos psicológicos como son nerviosismo, irritabilidad, ansiedad, estrés, falta de concentración, cansancio, a éstos, se suman los efectos fisiológicos, como alteraciones del sueño, metabolismo, sistema nervioso central, sistema neurovegetativo, circulatorio, inmunológico entre otros. Todos estos efectos se ven reflejados en la vida diaria de las personas, interviniendo en la eficiencia del desarrollo de las tareas y actividades, así como influyendo en el deterioro de la calidad en el descanso y recreo (García 1995, González 2012).

A nivel laboral se puede decir que sí se ha puesto mayor interés y las autoridades de todo el mundo, han impuesto restricciones con respecto a los niveles de ruido en los diferentes puestos de trabajo, por lo que los empresarios deben tomar medidas para reducir el ruido al nivel más bajo posible, en ocasiones se consigue con éxito y en otras sigue siendo un asunto pendiente (Dianicio y Rincón, 2010).

Los efectos por exposición a ruido se ven reflejados en la vida diaria de las personas, dando lugar a alteraciones en el cumplimiento de sus tareas y lo que es peor, en el deterioro en los espacios de descanso y recreo. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, es posible que se pueden presentar efectos no auditivos a exposiciones alrededor de los 75 dBA (Berglund, et.al., 1999).

### **Ruido, salud y molestia**

La situación general de degradación ambiental acústica puede incidir sobre la salud y el bienestar de los individuos, y es esta posibilidad el motivo principal que ha impulsado diversas investigaciones, que han permitido conocer con bastante exactitud los

efectos de la exposición a niveles sonoros elevados sobre la capacidad auditiva de los individuos, pero hasta el momento es mucho más incierta la relación entre el ruido ambiental y sus repercusiones no auditivas en la población (García y Garrido 2003).

Se estima que cerca de un tercio de la población mundial padece de algún grado de sordera o pérdida auditiva causada por exposición a sonidos de elevada intensidad (López 2000).

El estrés o estado de tensión, que se produce por exposición prolongada a ruidos superiores a los 85 dBA, por cierto muy comunes en las ciudades hoy día, puede generar hasta un 12 % más de problemas cardiovasculares, 37 % más de problemas neurológicos y 10 % más de problemas digestivos (García y Garrido 2003).

Los problemas a la salud relacionados con ruido de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (Berglund et. al. 1999) incluyen, entre otros:

- Interferencias con el comportamiento social (agresividad, protesta e impotencia)
- Interferencia con la comunicación oral
- Disminución en el rendimiento laboral y escolar
- Dolor y fatiga de la audición
- Posibles trastornos de la audición, disminución o pérdida
- Molestia
- Alteración del sueño y con ello dificultades en el rendimiento diurno y alteración a la respuesta inmune
- Efectos cardiovasculares.
- Respuestas hormonales y consecuencias al metabolismo
- Alteración a la tensión arterial.
- Cambios de conducta en los niños o personas sensibles.

Las personas se pueden exponer voluntariamente al ruido y no por ello estar conscientes de los riesgos asociados a esta exposición. Así mismo, otro aspecto importante en este sentido, es el relativo a la molestia que generalmente se agudiza cuando la exposición no es voluntaria.

Aunque la diferencia puede ser sutil, no es lo mismo sentir desagrado que estar molesto; hay muchos estudios que ponen de manifiesto que la percepción del sonido y la molestia que origina no tienen una relación tan fuerte como podría esperarse. La molestia está en función no únicamente de parámetros físicos como el nivel de presión sonora, el espectro de frecuencias y la evolución temporal, sino que esta sensación depende en gran medida de otros parámetros subjetivos inherentes a la persona y a su

estado de ánimo. Por todo ello, el tratar de estimar la relación dosis – efecto es un camino adecuado para valorar la molestia del ruido (Bravo et. al. 2003).

La evaluación de la molestia producida por el ruido ambiental se inicia como parte de las propuestas que se generaron en una reunión de la “International Commission on the Biological Effects of Noise” (ICBEN) en 1993, se propuso promover el uso de preguntas tipo, que pudieran ser compartidas internacionalmente, para evaluar los niveles de molestia que las fuentes de ruido producen sobre las personas y que el cuestionario reuniera diversas características que le permitieran interpretación y análisis conveniente (Bravo et. al. 2003).

En diversas encuestas y estudios realizados en grandes ciudades del mundo se ha llegado a la conclusión de que el ruido producido por la circulación, molesta al 36 % de la población, seguido por el ruido de aviones que alcanza el 9 % de la población y el de ferrocarriles, que sólo molesta al 5 % (de Esteban 2003).

A su vez, la directiva de la Unión Europea indica que los mapas estratégicos de ruido que se realicen han de aportar datos sobre las relaciones dosis-efecto y coste-beneficio, por lo que parece necesario incrementar los estudios que tengan como objetivo analizar los efectos por exposición al ruido ambiental (Comisión Europea 2011).

Buena parte de las investigaciones sobre los efectos del ruido se han centrado en una de las respuestas más extendida y compleja, conocida bajo el término general de “molestia”. El concepto de molestia hace referencia tanto a factores físicos relacionados con las características del ruido, como a los factores psicosociales en los que el individuo y la comunidad se ven insertos. Entre estos últimos cabe resaltar:

- La actitud hacia la fuente sonora
- La edad y el género de los afectados.
- La sensibilidad individual al ruido
- La personalidad, el temperamento.
- El estado de ánimo.
- El tipo de asentamiento o comunidad.

Las curvas de porcentaje de personas altamente molestas por ruido se relacionan sin dudas con aspectos socioculturales. Lam et al. (2012) comparan sus resultados en la ciudad de Hong Kong con otros estudios de países de occidente y observan que la tolerancia al ruido de tránsito por parte de la población es mucho mayor que la de poblaciones occidentales. Aunque los autores no descartan la posibilidad de que la mayor tolerancia esté asociada a que en los ambientes interiores normalmente están las

ventanas cerradas y hay aire acondicionado, lo que puede en principio magnificar la diferencia de niveles de presión sonora entre el exterior y el interior, también señalan que investigaciones sociológicas anteriores dieron como resultado una mayor tolerancia de los habitantes de Hong Kong hacia la alta densidad de población en la ciudad. Tal situación se explica más en función de la percepción de los lugareños que de las características de sus viviendas.

La molestia y los efectos a la salud por exposición a ruido son aspectos que van de la mano y se han de considerar de forma complementaria para una adecuada gestión y para iniciar esfuerzos dirigidos a su control.

### **Consideraciones para el monitoreo, diagnóstico y denuncia**

El esquema normativo es una base indispensable para el control de un problema como el ruido ambiental. Lamentablemente es muy frecuente que, aunque se tenga un buen esquema normativo, se carezca del esquema de supervisión, control y sanción efectivo y por lo tanto la confiabilidad en la normativa, decae.

También imprescindible, resulta contar con personal calificado, que tenga una formación profesional o técnica acorde a las necesidades de operación del equipo de monitoreo y que a su vez haya recibido alguna certificación y cursos que le capaciten para interpretar los resultados y generar opiniones con autoridad y dominio del tema.

Para el diagnóstico de los niveles de ruido en la ciudad, la posibilidad de utilizar equipos es muy amplia, porque las casas comerciales han incorporado una variedad extensa de diferentes marcas y modelos, adquirirlos en la actualidad es relativamente sencillo y hay representantes de ventas y distribución de marcas españolas, alemanas, danesas, inglesas, americanas, en los distintos países, la mayor demanda de estos equipos suele ser más que por las instancias de gobierno, por los consultores de higiene industrial y por las propias empresas e industrias con problemas de ruido.

Los aspectos más esenciales a tener en cuenta para la puesta en marcha de un sistema de monitoreo son diversos entre los más importantes está contar con los recursos económicos suficientes o bien con un esquema programado para garantizar un buen sistema de mantenimiento y renovar año con año la calibración, para dar certeza de la fidelidad de las mediciones, aunado a contar con un certificado que en caso de procedimiento legal, respalde la calidad con la que funciona el equipo para emitir el dictamen de registro de las mediciones.

Se debe disponer de un lugar adecuado para ubicar la estación, en caso de que se opte por un equipo fijo, que garantice la seguridad del mismo y que no existan obstáculos que interfieran con las mediciones. Para el equipo portátil, sólo son admisibles equipos tipo I ó tipo II, que son los que se calibran y la confiabilidad de las mediciones está garantizada por los fabricantes. Un error muy frecuente que se presenta en la atención a denuncias, es que se acude con equipos que no son profesionales y se quiere dar trámite de sanción o infracción, a partir de los resultados de esos equipos que más bien son de uso recreativo o didáctico.

La denuncia puede ser individual o colectiva (Herranz y López, 2002). Uno de los fenómenos más frecuentes de queja a las autoridades municipales es sin duda es el proveniente del ruido. En ocasiones, las ausencias normativas pueden desencadenar en limitantes para la atención a la denuncia; por ejemplo, cuando se activa el silbato del ferrocarril para salvaguardar la integridad de las personas y con ello continuamente se invade el sueño y la tranquilidad de los vecinos que viven en las colindancias, situación derivada de la falta de respeto a los planes parciales de urbanización.

Otra situación muy frecuente, es la relacionada con la presencia de festejos tradicionales y fiestas patronales de barrio que suelen emplear cohetes, tambores, música estridente que frecuentemente fastidia a los que no participan de la fiesta y las implicaciones culturales trascienden los esfuerzos normativos o legales.

El seguimiento a la denuncia debe ser un asunto muy profesional y cuidadoso por parte de la autoridad. El tener protocolos de respuesta suele resultar para agilizar los procedimientos, lo que es sumamente importante es recuperar estadísticas y zonificar los motivos de queja. De esta manera se va avanzando en la determinación de las causas más frecuentes de molestia por ruido y se puede progresar en las medidas de control.

Un esfuerzo muy valioso en este sentido es el que implementó la Defensoría del Vecino como parte de una serie de investigación en derechos humanos en las políticas públicas en Montevideo Uruguay. Aparte de concretar una serie de datos y aspectos técnicos y profesionales alrededor de la contaminación sonora, integra aspectos ligados a los derechos humanos que pueden hacer más conveniente en algunos aspectos la gestión del ruido, y puede servir para tomar en cuenta

el modelo para su posible incorporación en otras localidades (González, 2012).

### **Gestión del ruido en las ciudades**

El enfoque de la contaminación sonora como un problema de salud pública, ha recuperado importancia en el último año por la declaración de la OMS, que refiere los años de vida sana que se pierden anualmente en Europa a causa del ruido de tráfico (WHO, 2011). De ahí la importancia de que el problema de ruido se tenga en cuenta para:

- Fomentar en la clase política y los tomadores de decisión que el ruido es un problema de salud pública y como tal debe ser integrado en la política preventiva gubernamental de todos los niveles que corresponda.
- Realizar una evaluación inicial de la carga de enfermedad aplicada al ruido en las ciudades.
- Construir indicadores para determinar la molestia a causa de ruido y la enfermedad producto de esa exposición.
- Revisiones periódicas para medir los efectos a causa de la exposición y el comportamiento de los niveles en zonas críticas.

Existe una serie de dificultades en la gestión del ruido, como la burocratización relacionada con la pérdida de expedientes, que dificulta dar seguimiento a los casos, la dificultad en las competencias entre municipios, estados o distritos y la federación, el problema cultural de “hacer lo que nos parece” ante la falta de control y lo prolongado de los plazos para cualquier trámite. González (2012).

Otra limitante es el manejo de influencias, el abuso de poder, la corrupción, la falta de compromiso para hacer cumplir la ley, la falta de seguimiento entre la autoridad y el infractor ante la impotencia de la víctima, situación que se presenta frecuentemente en diversos esquemas no sólo para la atención a denuncias por ruido.

Otros aspectos de carácter más general que deben ser considerados con mayor relevancia son, por ejemplo: determinar los valores umbral para definir los niveles de protección homogéneos en cada localidad; establecer niveles más estrictos para el ruido ambiental en concordancia con los valores de protección que sugiere la Organización Mundial de la Salud, que son 55 dBA para el ruido diurno y 50 dBA para el nocturno, en México está en 65 y 60dBA respectivamente (Orozco et. al.2008b); mejoras técnicas, como aclaración de conceptos y

obligaciones, para definir zonas de aglomeraciones, zonas tranquilas, ejes viales, ruido industrial; la obligatoriedad de contar con mapas de ruido actualizados en zonas críticas como aeropuertos y las zonas de influencia y proximidades, así como plazos de cuando se le requiere cumplimiento a cuando se le solicita el cumplimiento del plan de acción (ADEME 2008).

Un aspecto de gran importancia pero generalmente olvidado en las políticas de actuación ambiental es la evaluación de las intervenciones ambientales realizadas con el fin de corregir impactos ambientales en relación al ruido (López 2000).

El problema de contaminación por ruido en las ciudades, puede resolverse a partir de la integración de la contaminación acústica como política de protección ambiental, gestionar la normatividad en materia de ruido, planear la obra pública a 30 años como mínimo con elementos ambientales y de salud, construcción de vías rápidas, gestionar y construir rutas de autobuses o sistema subterráneo eléctrico en el marco de una política integral de ordenamiento del transporte público, construir estacionamientos estratégicos, vigilancia y evaluación permanente de personas expuestas a altos niveles de ruido (Figueroa et. al. 2010).

Cuando se avanza en regulación urbana en la ciudad se toma en cuenta la calidad acústica como un indicador de la sostenibilidad urbana que se relaciona de forma directa con el ordenamiento del territorio (Rizzo et. al. 2011).

Observar el estudio de ruido ambiental de manera integral, permite atender otros conflictos ambientales que persisten en las ciudades, y atentan contra la calidad de vida y salud de la población.

El sector salud y el ámbito de la investigación científica tienen un compromiso ineludible, que es continuar profundizando en la investigación con el objetivo de conocer los efectos del ruido en la salud, estimar niveles, intensidades, frecuencias de riesgo y comunicar no sólo en el círculo de la ciencia, sino divulgar de los resultados de la investigación en el sector no formal, notas de prensa, radio, conferencias en centros escolares, blog, comunicaciones en línea, etc.

El sector académico y científico tiene un compromiso adicional en la gestión del ruido en la ciudad, que va desde capacitar profesionistas en la detección, análisis y monitoreo, hasta el diseño de tecnologías y software para la modelación y predicción de ruido, así como generar conocimiento de los efectos del ruido en la

salud de la población y en los sistemas biológicos, que permitan impulsar acciones más eficaces en la determinación, control y atenuación del ruido.

La gestión de ruido es, en resumidas cuentas, algo más que un marco legal bien hecho en el papel: es tener una congruencia de lo que se busca con lo que se tiene para conseguirlo, es decir, la normativa de protección o de regulación de la contaminación sonora y un esquema administrativo que vigile y en su caso sanciona su cumplimiento, implica también el compromiso social compartido de respeto, de corresponsabilidad, de denuncia y de sensibilidad cuando se pasa de ser la víctima a ser el generador del ruido, así como la forma en la que se maneja en lo individual y en lo colectivo.

### **CONCLUSIONES**

Los efectos del ruido en las personas requieren de mayor estudio de forma sistemática y los resultados deben ser socializados para avanzar en la toma de conciencia, y así minimizar comportamientos de riesgo precursores de daño a partir de la exposición a altos niveles de ruido. La difusión de los efectos del ruido requiere de un esquema de divulgación de la ciencia, en el ámbito científico y comunitario, como en el sector comunitario para crear conciencia e incidir en la sensibilidad personal y colectiva del ruido y sus efectos.

Es esencial ratificar de forma institucional, gubernamental, colectiva e individual, la importancia del ruido como forma de contaminación, y a partir de ello avanzar de una forma más efectiva en la atención a los problemas derivados de la exposición a ruido en la ciudad, con acciones como:

- Contribuir a la formulación de un marco normativo que incluya esquemas de detección de niveles acorde a los avances tecnológicos.
- Vigilar el cumplimiento de los planes de acción, una vez que se exige el cumplimiento de niveles mínimos en zonas críticas.
- Exigir a los sectores críticos el cumplimiento en el ámbito de su competencia en lo que hace, por ejemplo, a los planes parciales de desarrollo urbano, la construcción de casas y edificios con materiales acústicos, red vial y transporte público eficiente.

Considerar la calidad acústica en las ciudades como un tema prioritario, al que se le destinen recursos y se le confiera un esquema igualmente importante que a las otras formas de contaminación ambiental, conducirá a un entorno acústico más saludable y a una sociedad más solidaria.

## **REFERENCIAS**

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise d'Énergie, ADEME (2008) Guide pour l'élaboration des Plans de prévention du bruit dans l'environnement à destination des collectivités locales. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. N°6182, julio 2008. République Française,

Berglund B., Lindvall T., Schwella D. (1999). Guidelines for Community Noise. World Health Organization WHO. Londres, Inglaterra.

Bravo M., Tarrero, F., Rodríguez, T., Sorribas, R. (2003). Elaboración de la encuesta y elección de la muestra para el estudio psicosocial de la molestia ocasionada por el ruido. Tecni-Acústica, 2003. Bilbao, España

Comisión Europea (2011). Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo relativo a la aplicación de la Directiva sobre el ruido ambiental de conformidad con el artículo 11 de la Directiva 2002/49/CE COM 2011. 321. Bruselas, Bélgica.

de Esteban, A. (2003). Contaminación acústica y Salud, Universidad Rey Juan Carlos, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales UCM. España

Dianicio R, Rincón, S., (2010) Control de ruido en un ventilador industrial, Tesis profesional para obtener el título de Ingeniero en comunicaciones y electrónica. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica, ESIME. México, D.F.

Figuroa A., Orozco M., García J. (2010). Urban Noise and Transport as a Strategy of Environmental Quality. "Proceedings of Meetings on Acoustics", 11, (040003), "The Acoustical Society of America", ASA. 1-9

García A. (1995). La contaminación sonora en la comunidad valenciana. Consell Valencià de Cultura. Generalitat Valenciana. Valencia, España.

García S., Garrido F. (2003). "La contaminación acústica en nuestras ciudades". Fundación "La Caixa". Barcelona, España.

González E. (2012). Contaminación Sonora y Derechos Humanos, Serie Investigaciones: Derechos Humanos en las políticas públicas, No. 2 Defensoría del Vecino de Montevideo.

Herranz P., López, B. (2002). Modelo de impacto del ruido ambiental. Tecniacústica 2000, Madrid, España,

Lam, K.C.; Brown, A. Lex; Kamp, I van; Wong, T.W.; Chan, Y.K.; Yeung, M.K.L.; Lui, A.; Law, C.W.; Chung, Y.T.(2012) A large scale study of the health effects of transportation noise in Hong Kong. Acoustics 2012 Hong Kong.

López U., Fajardo D., Chavolla G., Magaña, R., Mondragón G., Robles M., (2000). Hipoacusia por ruido: un problema de salud y conciencia pública. Revista de la Facultad de Medicina Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM 43 (2), P.41-42

López B, Carles J, Herranz K., (2002) El estudio de los aspectos perceptivos en la acústica ambiental. Revista Acústica, España. XXX1 (3-4).

Orozco, M. (2008a). El análisis de ruido en Guadalajara: Elementos Clave para la realización de estudios de ruido urbano. Capítulo 6. En "Investigación Socioambiental: Paradigmas aplicados en salud ambiental y educación ambiental", Curiel-Ballesteros A. (eds.), 161-182, Universidad de Guadalajara, Guadalajara Jalisco, México.

Orozco M., Figuroa A., García J. (2008b). Investigation and analysis of urban noise for sustainability. "Proceedings of Meetings on Acoustics", 5, 040002, "The Acoustical Society of America". ASA. 1-10.

Rizzo, A., Velis, A., Vechiatti, N., Iasi, F. (2011) Nueva propuesta normativa sobre contaminación acústica ambiental en la provincia de Buenos Aires, Reunión Regional de Acústica 2011. Montevideo, Uruguay.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT (2008), Compendio de la situación del Medio Ambiente en México. México.

[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_2008/index\\_informe\\_2008.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/index_informe_2008.html)

World Health Organization, WHO (2011). Regional Office for Europe. Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe.

---

Este documento debe citarse como: Orozco Medina M. G., González A. E. (2015). **La importancia de la contaminación por ruido en las ciudades**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 129-136, ISSN 1665-529-X.