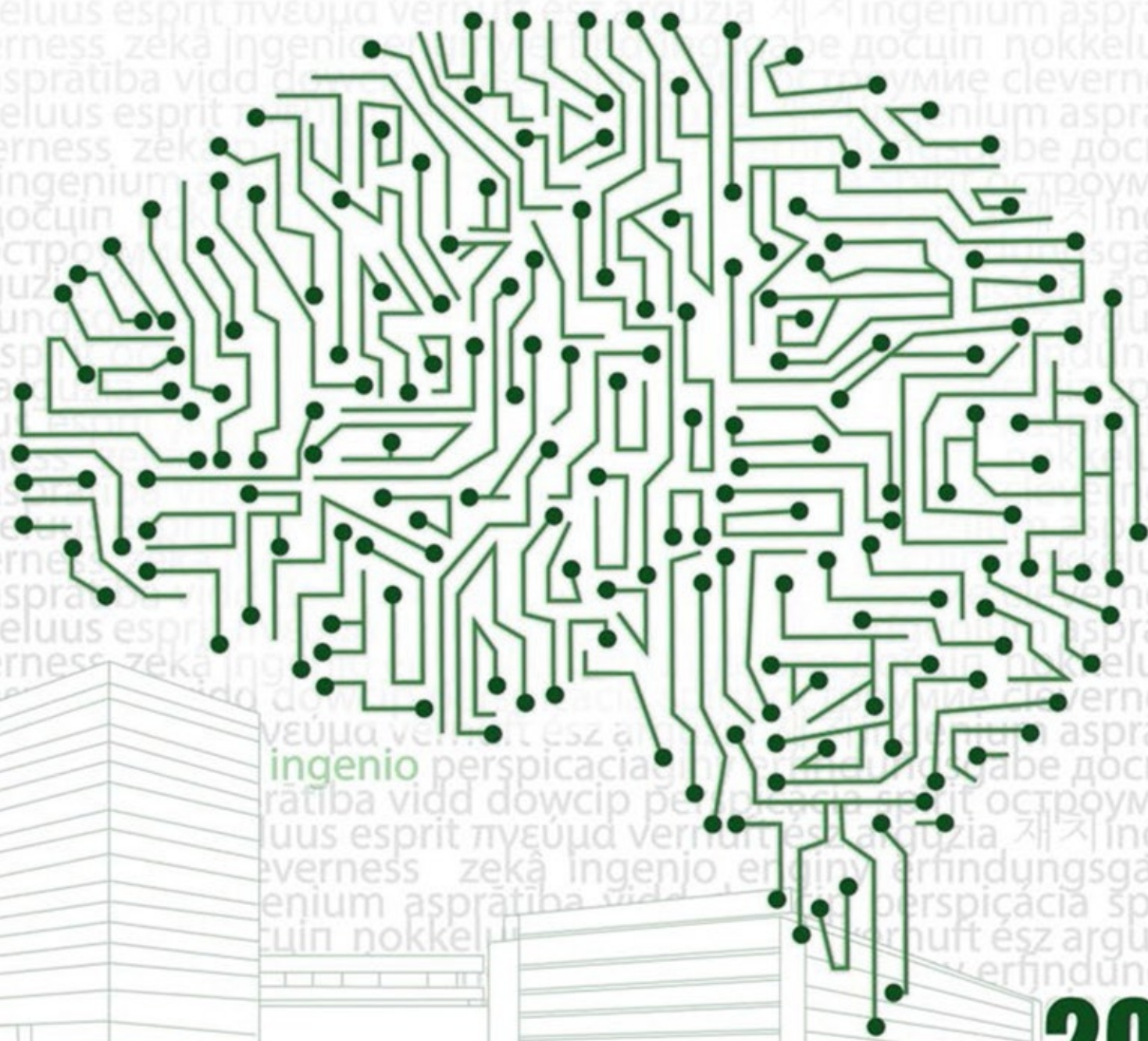


# Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



# DIRECTORIO TUTORES

**FRANCISCO  
ALONSO RUIZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2013



**ARACELI  
AGUILAR MORA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2009 y 2014



**GIL ARMANDO  
BÁEZ DÍAZ - CONTI**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2010



**CARLOS  
BUSTOS MOTA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2010



**MARTÍN  
CASTILLO FLORES**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2012



**ALEJANDRO  
CARRILLO VIZCAYA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2008 y 2012



**JOSÉ ANTONIO  
CISNEROS ROSAS**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2011 y Rev. 2013



**SILVIA  
CONTRERAS BONILLA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2009, 2014, Conv. 2009, 2010 y 2011



**JESÚS EDMUNDO  
CRUZ PORRAS**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2012



**MARÍA DOLORES  
CUELLAR JUÁREZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2011



**JULIETA  
DOMÍNGUEZ LÓPEZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2011



**MARCO ANTONIO  
GONZÁLEZ Y GONZÁLEZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2010



**RAÚL DAVID  
GONZÁLEZ PADILLA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2012



**FERNANDO DANIEL  
LAZCANO HERNÁNDEZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2011



**JOSUÉ  
MOLINA BONILLA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2013



**Coordinación de Tutores  
Facultad de Ingeniería**

Edificio Luis Barragán, Cubículo 3  
Ciudad Universitaria BUAP  
+52 (222) 229-5500 \* 7642

[www.ingenieria.buap.mx](http://www.ingenieria.buap.mx)

# Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

ABRIL-SEPTIEMBRE 2014,  
AÑO 9, NO. 20

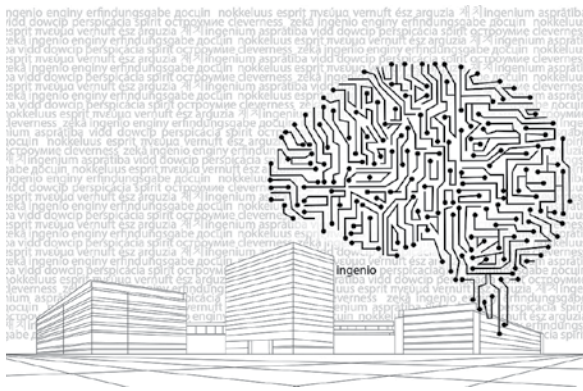


IMAGEN EN PORTADA  
ILUSTRACIÓN DIGITAL  
POR INGRID LÓPEZ  
GUAJARDO  
BASADA EN VECTOR DE  
TECNOLOGÍA DISEÑADO  
POR FREEPIK.ES

## DIRECTORIO

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**MTRO. JOSÉ ALFONSO ESPARZA ORTÍZ**  
RECTOR

**DR. RENÉ VALDIVIEZO SANDOVAL**  
SECRETARIO GENERAL

**M.C.E. MARÍA DEL CARMEN MARTÍNEZ REYES**  
VICERRECTORA DE DOCENCIA

## FACULTAD DE INGENIERÍA

**M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO**  
DIRECTOR

**M.I. ANA ELENA POSADA SÁNCHEZ**  
SECRETARIA ACADÉMICA

**M.I. FERNANDO D. LAZCANO HERNÁNDEZ**  
SECRETARIO ADMINISTRATIVO

**DR. GABRIEL JIMÉNEZ SUÁREZ**  
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS  
DE POSGRADO Y DIRECTOR DE LA REVISTA

**REVISTA "INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP"**

**DR. FILIBERTO CANDIA GARCÍA**  
EDITOR RESPONSABLE

**LDF. INGRID LÓPEZ GUAJARDO**  
DIFUSIÓN Y COMUNICACIÓN

## CONSEJO EDITORIAL

**DRA. MARÍA MAURA MARGARITA TEUTLI LEÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

**DR. ALEJANDRO BAUTISTA HERNÁNDEZ**  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

**DR. MARTÍN SALAZAR VILLANUEVA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

**DRA. PATRICIA MARTÍNEZ VARA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

**DRA. SANTA TOXQUI LÓPEZ**  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

**MTRA. GELSOMINA GUADALUPE QUE CANDIA**  
JEFA DEL ÁREA DE EVALUACIÓN  
INSTITUCIONAL, UADY

## ÍNDICE

### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

- 3 Remoción de colorantes textiles utilizando adsorbentes carbonáceos preparados a partir de residuos vegetales y su caracterización**  
Alejandra Alicia Peláez Cid, Ana María Herrera González, Alejandro Bautista Hernández, Marco Antonio Tlalpa Galán
- 9 Degradación de compuestos azufrados presentes en diésel y gasolina: La electroquímica como tecnología alternativa para su remoción**  
Andrea Becerra Córdoba, Erika Méndez Albores
- 23 Caracterización de inundaciones y vulnerabilidad de la población con casos de estudio en México**  
Oscar Sánchez Flores, Edgar Iram Villagrán Arroyo, Ana Elena Posada Sánchez, Carlos Díaz Delgado
- 33 Clasificación del subsuelo en función de la velocidad de la onda sísmica de corte**  
Gabriel Jiménez Suárez, Edgar Iram Villagrán Arroyo, Joaquín Lozano Mercado, Ana Elena Posada Sánchez

### ARTÍCULOS DE DIFUSIÓN ACADÉMICA

- 39 Análisis de la línea 12 del Metro**  
M. A. Cruz Gómez, S. Calderón González, J. Zilch Hernández, J. S. Martínez Martínez, J. A. Oropeza Piñán.
- 53 La xilema del Helianthus annuus L. como sustituto del poliestireno expandido en sistemas de embalaje**  
Israel Rodríguez Mora
- 57 Análisis de esfuerzos en engranes rectos y su validación aplicando mecánica computacional (FEM)**  
Ana Cecilia Piñón Reyes, J. Flores Méndez
- 63 La salud pública un indicador para validar la viabilidad de las tecnologías alternativas**  
Filiberto Candia García, Juan Carlos Carmona Rendón, Claudia Aida Landa García

# EDITORIAL

Innovación, creatividad o ingenio ¿Cuál característica desarrollar, para integrarse y lograr éxito en el mundo laboral? La competitividad natural obliga a la evolución y adaptación de las sociedades, para la supervivencia de la especie.

En este sentido, el acercamiento al conocimiento y nuevas tendencias multidisciplina-rias, permiten considerar de manera más amplia las alternativas que promuevan una sinergia de acciones con beneficio directo al desarrollo personal y sustentable.

Lograr una consolidada trayectoria ingenieril requiere vincular los conocimientos, la prác-tica y el ingenio – que es producto de la perseverancia y consistencia de una sólida preparación académica (creatividad) y de la capacidad de asombro ante el autodescu-brimiento que reduce los requerimientos procedimentales de una técnica (innovación).

El ingenio se nutre de las matemáticas (trigonometría y aritmética), de las ciencias naturales (la química), de las ciencias sociales (salud pública). Asimismo requiere prevenir las amenazas (deterioro del medio ambiente), aprovechar las oportunidades (análisis y desarrollo acelerados de tecnología) y comprender los nuevos retos de la sustentabilidad (uso de nuevos materiales).

Esta transversalidad multidisciplinaria entretejida en las ciencias exactas (matemá-ticas) y en la formación de tronco común en ingeniería (mecánica de sólidos), debe iniciar como una inquietud a desarrollarse, presentando publicaciones de divulgación en ciencia y tecnología que permitan acompañar y fortalecer la formación académica especializada (Método de los elementos finitos) en los estudiantes de ingeniería.

La Revista Ingeniería y Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Uni-versidad Autónoma de Puebla (RITFIBUAP), asume el compromiso hacia el desarrollo del ingenio, presentando en su contenido artículos que difunde y divulgan la innova-ción y la creatividad.

Los artículos son producto de la experiencia y la tenacidad de los autores, quienes se encuentran abriendo una nueva brecha del conocimiento y ampliando las áreas de aplicación, en pro de la mejora de la sustentabilidad.

Avanzar a las nuevas sociedades del conocimiento, requiere fomentar el ingenio en la sustentabilidad global, las acciones encauzadas para ello nunca serán mínimas y su impacto en algún momento será detonante de un proceso de transformación social (v.g. China), que demande la integración de la ingeniería en la cultura, la economía y la política.

---

**INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA FACULTAD DE INGENIERÍA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**, Año 9, No. 20, Abril-Septiembre de 2014, es una publicación semestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur 104, Col. Centro, C.P. 72000, Puebla Pue., y distribuida a través de la Facultad de Ingeniería, con domicilio en Blvd. Valsequillo esq. Av. San Claudio s/n, Edif. 108-C Ciudad Universitaria BUAP, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla Pue., Tel. (52) (222) 229 5500 ext. 7618, www.ingenieria.buap.mx, Editor Responsable Dr. Filiberto Candia García, posgrado.fi.buap@gmail.com. Reserva de Derechos al uso exclusivo 04-2008-022718142400-102. ISSN: 2007-1876, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Con Número de Certificado de Licitud de Título y Licitud de Contenido: 14935, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa en Talleres Gráficos. Intra Comunicación. Calle 14 Oriente No. 2803-A. Col: Humboldt. C.P. 72370 Puebla, Pue. Tel. 01(222) 296 3953, éste número se terminó de imprimir en Febrero de 2015 con un tiraje de 3000 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

**INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA FACULTAD DE INGENIERÍA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA** es una publica-ción semestral arbitrada de divulgación científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, dirigida a profesionistas, profesores, investigadores y estudiantes de las diferentes áreas de ingeniería.



# Remoción de colorantes textiles utilizando adsorbentes carbonáceos preparados a partir de residuos vegetales y su caracterización

Alejandra Alicia Peláez Cid, Ana María Herrera González,  
Alejandro Bautista Hernández, Marco Antonio Tlalpa Galán

## RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de adsorción de colorantes textiles sobre adsorbentes carbonáceos preparados a partir de residuos vegetales como la cáscara de la fruta de *Opuntia ficus indica* (CenTuna, CarTunaT y CarTunaQ) y la semilla de *Casimiroa edulis* (CenZAP, CarZAPT y CarZAPQ). CenTuna y CenZAP son las cenizas obtenidas a 550 °C; CarTunaT y CarZAPT son los materiales carbonizados a 400 °C y por último, CarTunaQ y CarZAPQ son los carbones activados químicamente a 400 °C utilizando  $H_3PO_4$  como agente activante. Todos los adsorbentes se molieron y tamizaron para obtener partículas con un tamaño entre 0.25 y 0.84 mm. Los resultados de adsorción estática mostraron que las cenizas y los carbones activados químicamente fueron más eficaces en la remoción de colorantes para ambos residuos vegetales. Con CenTuna y CarTunaQ, se alcanzaron valores de remoción de hasta 100% para colorantes ácidos, básicos y directos, presentes en soluciones modelo. En cuanto a las aguas residuales que contenían colorantes reactivos, el porcentaje de remoción se encontró entre 60 y 100%. Para los efluentes conteniendo colorantes del tipo cuba, fue de 42 a 52%. En el caso de CenZAP y CarZAPQ, al tratar efluentes reactivos los valores de remoción oscilaron entre el 63 y 91%. Para los efluentes cuba, el porcentaje varió desde 57 hasta 68%. La caracterización de los adsorbentes se realizó mediante microscopía electrónica de barrido, espectroscopia infrarroja y adsorción de nitrógeno. Los valores de las superficies específicas de BET para CarTunaQ y CarZAPQ fueron 1025 y 1047  $m^2/g$ , respectivamente.

**Palabras clave:** Residuo de la fruta de *Opuntia ficus indica*, Residuo de la fruta de *Casimiroa edulis*, Adsorbentes Carbonáceos, Remoción de colorantes textiles.

## ABSTRACT

This paper presents the adsorption results of textile dyes on carbonaceous adsorbent prepared starting off vegetable residue such as *Opuntia ficus indica* (CenTuna, CarTunaT, and CarTunaQ) and *Casimiroa edulis* (CenZAP, CarZAPT, and CarZAPQ) fruit wastes. CenTuna and CenZAP consist of ashes obtained at 550 °C; CarTunaT and CarZAPT consist of the materials carbonized at 400 °C; lastly, CarTunaQ and CarZAPQ consist of chemically activated carbons using  $H_3PO_4$  at 400 °C. All adsorbents were ground and sieved to obtain a particle size ranging from 0.25 to 0.84 mm. The static adsorption results showed that both ashes and chemically activated carbon are more effective at dye removal for both vegetable residues. For CenTuna and CarTunaQ, removal rates of up to 100% in the cases of basic, acid, and direct dyes were achieved. Regarding wastewater containing reactive dyes, the efficiency ranged from 60 to 100%. For vat effluents, it ranged from 42 to 52%. In the case of CenZAP and CarZAPQ, it was possible to treat reactive effluents with rates ranging between 63 and 91%. Regarding vat effluents, it ranged from 57 to 68%. The process of characterization for the carbonaceous adsorbents was done using scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, and nitrogen adsorption. The specific surface areas for CarTunaQ and CarZAPQ were 1025 and 1047  $m^2/g$ , respectively.

**Keywords:** *Opuntia ficus indica* fruit waste, *Casimiroa edulis* fruit waste, Carbonaceous adsorbents, Textile dyes removal.

Recibido 20 de marzo, 2014; aceptado 20 de junio, 2014

Alejandra Alicia PELÁEZ CID, Alejandro BAUTISTA HERNÁNDEZ, Marco Antonio TLALPA GALÁN  
Facultad de Ingeniería, BUAP, Edificio 108A, Ciudad Universitaria, CP. 72570, Puebla, Puebla, México

Ana María HERRERA GONZÁLEZ  
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Pachuca de Soto, Hidalgo, México

## 1 INTRODUCCIÓN

El carbón activado es uno de los adsorbentes más utilizados para la eliminación de contaminantes industriales, compuestos orgánicos, metales pesados, detergentes, sustancias húmicas, hidrocarburos clorados, microorganismos, pesticidas, herbicidas y colorantes, entre muchos otros compuestos tóxicos (Bhatnagar y Sillanpää 2010). Existen dos formas de activación para producir carbones activados, la activación física o térmica y la química. Durante la activación física, la materia prima se somete a gasificación con vapor de agua, dióxido de carbono o los gases de combustión producidos durante la carbonización. La activación química consiste en la impregnación de la materia prima como tal o previamente carbonizada con reactivos químicos como,  $ZnCl_2$ ,  $NaOH$ ,  $KOH$ ,  $K_2CO_3$ ,  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  o  $H_3PO_4$ , después se carboniza, controlando la velocidad de calentamiento y finalmente se lava el carbón para eliminar el agente activante. La aplicación de una corriente gaseosa de aire o nitrógeno, es una práctica común durante la carbonización ya que genera un mejor desarrollo de la porosidad del material (Peláez-Cid y Teutli-León, 2012).

Comercialmente el carbón activado se prepara por medio de pirólisis oxidativa utilizando como materia prima, madera, turba, lignito, carbón mineral, huesos y cáscara de coco (Elizalde-González et al. 2007). El carbón activado se considera un material costoso debido a los tratamientos físico-químicos y el alto consumo de energía utilizados durante su producción, su bajo rendimiento y los tratamientos térmicos o con disolventes usados para su regeneración. Con la intención de reducir el costo de producción del carbón activado, las investigaciones en la actualidad se enfocan hacia la utilización, tanto de desechos agrícolas como industriales (Elizalde-González y Hernández-Montoya 2007). Además, el uso de estos precursores reduce la generación de residuos sólidos en zonas rurales y urbanas. El objetivo de esta investigación fue producir adsorbentes carbonáceos de bajo costo a partir de los residuos de las frutas de *Opuntia ficus indica* y *Casimiroa edulis*, los adsorbentes carbonáceos producidos se utilizaron en la remoción de diferentes tipos de colorantes textiles. Mediante la caracterización se encontró la relación entre sus propiedades estructurales y químicas de su superficie y su capacidad de adsorción.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Los seis adsorbentes preparados fueron carbonizados en una mufla Thermolyne 48000 bajo la atmósfera de los gases de combustión. Tres de los adsorbentes fueron preparados a partir del residuo de la fruta de *Opuntia ficus indica* y fueron designados como: CenTuna, CarTunaT y CarTunaQ. Los tres adsorbentes preparados a partir de los desechos de la fruta de *Casimiroa edulis* fueron: CenZAP, CarZAPT y CarZAPQ. CenTuna y CenZAP son las cenizas obtenidas a partir de calentamiento súbito a 550 °C durante 3 h; CarTunaT y CarZAPT son los adsorbentes carbonizados a 400 °C durante 3 h con calentamiento controlado, las velocidades de calentamiento fueron 4.7 y 3.8 °C/min respectivamente; por último, CarTunaQ y CarZAPQ son los carbones activados químicamente impregnados con  $H_3PO_4$  y carbonizado a 400 °C durante 3 h, las rampas de calentamiento fueron 4.3 y 2.1 °C/min, respectivamente. Sólo los materiales activados químicamente se lavaron con agua destilada, para eliminar el  $H_3PO_4$ , hasta que se obtuvo un pH neutro en la solución de lavado. Todos los materiales se molieron y tamizaron para obtener carbones activados en forma granular con un tamaño de partícula de 0.25 – 0.84 mm.

Para conocer el efecto del proceso de carbonización en las propiedades de adsorción de los adsorbentes carbonáceos preparados, se seleccionaron diferentes tipos de colorantes de acuerdo con la clasificación del Colour Index (CI) (2011). En la tabla 1 se muestran los colorantes seleccionados y algunas de sus propiedades. Con excepción de los colorantes cuba, que son insolubles en agua y de los colorantes básicos, que son moléculas catiónicas, el resto de las moléculas de los colorantes seleccionados se pueden considerar aniónicas. Tres de los colorantes se estudiaron en solución acuosa mientras que siete se encontraban presentes en aguas residuales generadas durante el proceso de teñido de tejidos de algodón.

Se estudió la adsorción estática a 30 °C para cada uno de los adsorbentes preparados utilizando una relación, masa de adsorbente por volumen de solución de colorante,  $m/V = 0.01$  g/L. El tiempo de contacto fue de 24 h, aunque en algunos casos, se observó que dentro de la primera hora de contacto, el colorante se había eliminado completamente de la solución. Los resultados de adsorción se compararon con los de un carbón en polvo comercial de la marca Sigma de México con tamaño de partícula de 74 – 150  $\mu m$ .

**Tabla 1.** Colorantes seleccionados y sus características.

Colorante (CI Nombre Genérico)	Clave	Clasificación textil	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)	Tipo de solución	pH	C <sub>i</sub> (mg/L)
Azul de metileno (Azul Básico 9)	BB9	Básico	665	Acuosa	6.1	50
Cristal violeta (Violeta Básico 3)	BV3	Básico	590	Acuosa	6.0	50
Ácido Carmínico (Rojo Natural 4)	NR4	Ácido	500	Acuosa	3.2	50
Verde Sirius (Verde Directo 1)	DG1	Directo	610	Agua residual	9.8	20
Turquesa Sirius (Turquesa Directo 86)	DT86	Directo	620	Agua residual	9.9	68
Cuba Marino	VNB	Cuba	560	Agua residual	12	—
Cuba Gris Oscuro	VDGY	Cuba	400	Agua residual	12	—
Azul Reactivo	RB	Reactivo	610	Agua residual	11	—
Rojo Reactivo	RR	Reactivo	515	Agua residual	11	—
Anaranjado Reactivo	RO	Reactivo	495	Agua residual	11	—

La cuantificación de los colorantes adsorbidos se realizó por espectrofotometría de absorción en la región visible, usando un espectrofotómetro HACH modelo DR 5000, a la longitud de onda de máxima absorbancia de cada uno de los colorantes seleccionados. Para BB9, BV3, NR4, DG1 y DT86 se construyeron sus respectivas curvas de calibración. Para los colorantes que se encontraban presentes en las aguas residuales (reactivos y cuba), la cuantificación se realizó mediante la observación de la disminución de la intensidad de la principal banda de absorción.

Los espectros infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR) de los adsorbentes se obtuvieron usando un espectrómetro Perkin Elmer Spectrum One con aditamento de reflectancia total atenuada (ATR) en el intervalo espectral de 4000 - 650  $\text{cm}^{-1}$ . Las características superficiales de los adsorbentes se observaron con un microscopio electrónico de barrido, modelo JEOL JSM 6300 operado a 30 kV, previamente las muestras se recubrieron con oro.

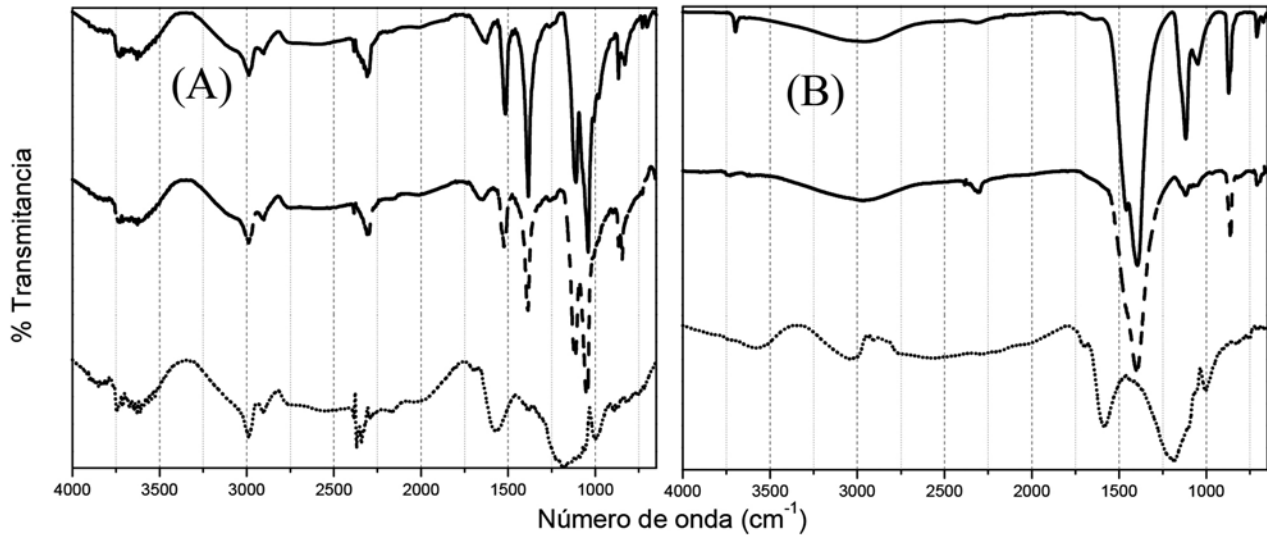
La superficie específica por adsorción de nitrógeno a 77 K para los carbones activados químicamente con  $\text{H}_3\text{PO}_4$  se obtuvo en un analizador de superficies Micromeritics ASAP 2020.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los grupos funcionales orgánicos de los adsorbentes carbonáceos se determinaron por medio de los espectros FTIR (figura 1). Para CarTunaT y Cen-

Tuna (figura 1B), los espectros son semejantes, sólo se observa una ligera disminución en la intensidad de ciertas bandas. Sin embargo, en el caso de CarTunaQ, sus grupos funcionales no coinciden con los anteriores. Tanto CenTuna y CarTunaT exhiben bandas en 1400, 1100 y 1050  $\text{cm}^{-1}$  que son características de vibraciones de deformación de O-H y estiramiento de C-O en alcoholes y fenoles primarios, secundarios y terciarios. CarTunaQ muestra una banda en aproximadamente 3500  $\text{cm}^{-1}$ , que indica la presencia de aminas primarias y secundarias debido a las vibraciones de estiramiento N-H. Esto se confirma con la banda que se encuentra en 1600  $\text{cm}^{-1}$  que indica vibraciones de deformación N-H para la misma clase de aminas. CarTunaQ también presenta una banda ancha a 1200  $\text{cm}^{-1}$  debido a las vibraciones de deformación de O-H y estiramiento de C-O para los fenoles. Además, a causa del tratamiento de impregnación con  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , aparecen una banda en 999 y un hombro en 1070  $\text{cm}^{-1}$ , característicos de grupos fosfato (Suárez-García et al. 2004). Para CarZAPQ (Fig. 1A) también se observa la aparición de bandas en 999 y 1070  $\text{cm}^{-1}$ .

Los adsorbentes carbonáceos obtenidos a partir del residuo de la fruta de *Casimiroa edullis* (figura 1A) presentan una mayor cantidad de grupos funcionales, incluyendo vibraciones de deformación de N-H (1500  $\text{cm}^{-1}$ ), deformación de O-H y de estiramiento C-O (1400, 1100 y 1050  $\text{cm}^{-1}$ ) y vibraciones de estiramiento C-H (alquenos a 3000  $\text{cm}^{-1}$ ). De manera



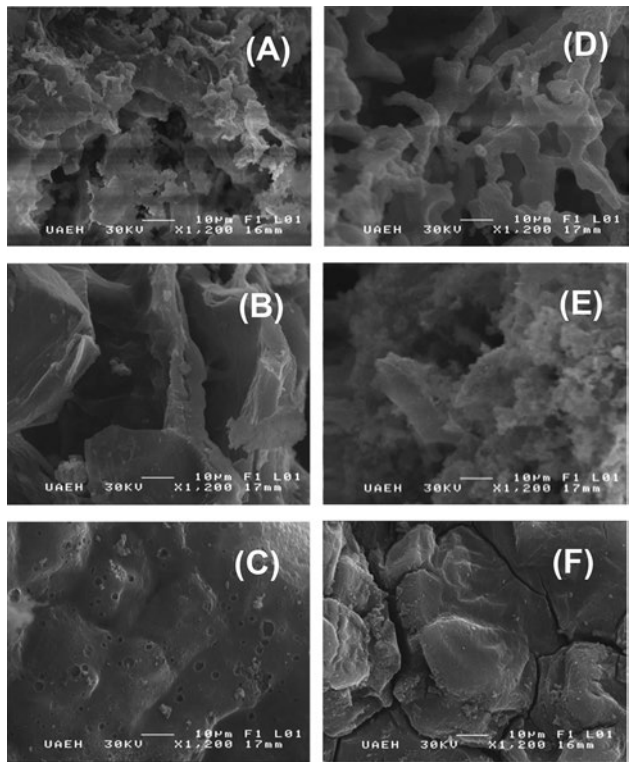
**Figura 1.** Espectros FTIR de los adsorbentes carbonáceos preparados utilizando los residuos de las frutas de *Casimiroa edulis* (A) y *Opuntia ficus indica* (B). — Cenizas, — Carbones activados físicamente y — Carbones activados químicamente con  $H_3PO_4$ .

semejante a los carbones térmicos preparados a partir de los residuos de la fruta de *Opuntia ficus indica*, CenZAP y CarZAPT presentan prácticamente las mismas bandas.

En cuanto a su apariencia superficial, las micrografías obtenidas por SEM (figura 2) para las cenizas (A, D) y carbones activados físicamente (B, E) obtenidos a partir de ambos residuos muestran la formación de cavidades de forma y tamaño irregular debido a la estructura irregular de la materia prima y la liberación de compuestos volátiles durante el tratamiento térmico, así como pequeñas partículas depositadas en la superficie.

Una vez más, los carbones activados con  $H_3PO_4$  resultan ser superficialmente diferentes. CarTunaQ (figura 2C) muestra orificios superficiales y CarZAPQ (figura 2F) exhibe agrietamiento superficial en lugar de desarrollo de porosidad como tal.

La capacidad de adsorción de los adsorbentes carbonáceos preparados, expresada como porcentaje de remoción de colorante, se presenta en la figura 3. La figura 3A muestra que los colorantes ácido, básicos y directos se retienen excelentemente en los adsorbentes carbonáceos, de manera semejante a como se adsorben en un carbón comercial (barra blanca). La figura 3B muestra la remoción de colorantes cuba y reactivos presentes en agua residual, la cual resultó ser aceptable, aunque no tan buena como en los casos anteriores. Esto se debe a que el agua residual es una matriz muy compleja, que contiene diversos compuestos (sales inorgánicas como el carbonato,



**Figura 2.** Micrografías SEM de los adsorbentes carbonáceos obtenidos a partir de los residuos de las frutas de *Opuntia ficus indica* (A, B, C) y *Casimiroa edulis* (D, E, F). Cenizas (A y D), Carbones activados físicamente (B y E) y Carbones activados químicamente (C y F).

hidróxido, hidrosulfito o sulfato de sodio y agentes tensoactivos) utilizados durante el proceso de teñido, los cuales compiten por los sitios activos, inhibiendo



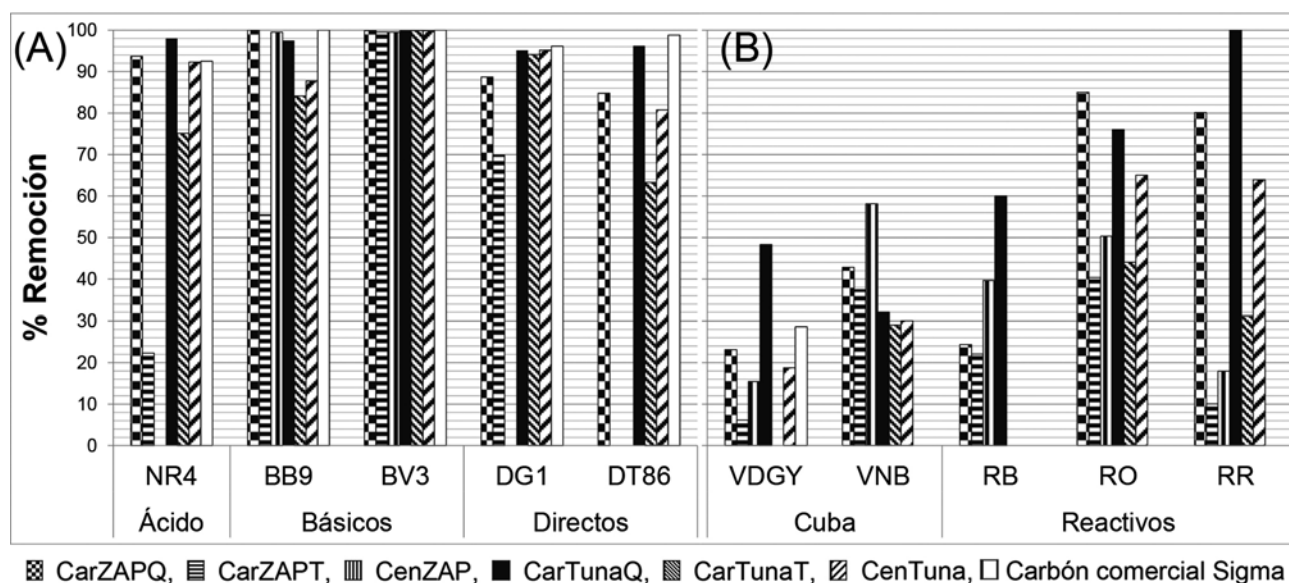


Figura 3.

así la interacción de los colorantes con la superficie de los adsorbentes.

La alta adsorción tanto de los colorantes aniónicos (NR4, DG1 y DT86) como catiónicos (BB9 y BV3) se debe a la presencia de grupos funcionales superficiales aniónicos (C-O y O-H) y catiónicos (N-H) que se observan en los espectros IR. Los cuales le confieren cierta polaridad a los adsorbente carbonáceos y en consecuencia, la capacidad de interaccionar de forma iónica con los colorantes. Además, las micrografías muestran una gran cantidad de cavidades en las partículas de los adsorbentes carbonáceos, las cuales favorecieron el desarrollo de la porosidad y la superficie específica, alcanzándose valores de 1025 y 1045 m<sup>2</sup>/g para CarTunaQ y CarZAPQ respectivamente. La alta superficie específica, además de la presencia de grupos funcionales aniónicos y catiónicos presentes en la superficie de los adsorbentes carbonáceos les confirieron una mayor capacidad de adsorción.

#### 4 CONCLUSIONES

Tanto los desechos de las frutas de *Opuntia ficus indica* y *Casimiroa edulis* en sus formas carbonizados son eficaces en la eliminación de colorantes textiles, alcanzando tasas de remoción de color superiores incluso a la de un carbón activado comercial, con tamaño de partícula menor al de los carbones activados preparados. Por lo tanto, es posible producir carbones activados a partir de estos dos residuos que son comunes y abundantes en estados del centro de México, como Puebla e Hidalgo. Las capacidades de adsorción de los

adsorbentes preparados dependen en gran medida de sus grupos funcionales superficiales y su morfología, responsable de la alta superficie específica.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP por el apoyo financiero en el proyecto PECA-ING12-I.

#### REFERENCIAS

- [1] Bhatnagar A. y Sillanpää M. (2010). Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment—A review, *Chem. Eng. J.* 157, 277–296.
- [2] Elizalde-González M.P. y Hernández-Montoya V. (2007). Characterization of mango pit as raw material in the preparation of activated carbon for wastewater treatment, *Biochem. Eng. J.* 36, 230–238.
- [3] Elizalde-González M.P., Mattusch J., Peláez-Cid A.A. y Wennrich R. (2007). Characterization of adsorbent materials prepared from avocado kernel seeds: Natural, activated and carbonized forms, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 78, 185–193.
- [4] Peláez-Cid A.A. y Teutli-León M.M.M. (2012). Lignocellulosic Precursors Used in the Elaboration of Activated Carbon. En: *Lignocellulosic Precursors used in the Synthesis of Activated Carbon - Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment* (Hernández-Montoya V. y Bonilla-Petriciolet A. Ed.) InTech, Croatia, 1-18.

[5] Society of Dyers and Colourists & American Association of Textile Chemists and Colorists (2011). Colour Index [en línea]. <http://www.colour-index.com>.

[6] Suárez-García F., Martínez-Alonso A. y Tascón J.M.D. (2004). Activated carbon fibers from Nomex by chemical activation with phosphoric acid, Carbon 42, 1419-1426.

## BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

# ACREDITACIONES

Nuestro programa de la Licenciatura en Ingeniería Civil cuenta con reconocimiento vigente del Consejo para la Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), organismo reconocido por COPAES para la evaluación de programas de Ingeniería.

### CACEI

EL CONSEJO DE ACREDITACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA A.C.  
RECONOCIDO POR EL CONSEJO PARA LA ACREDITACIÓN DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, A.C.

## ACREDITA

AL PROGRAMA DE

*INGENIERÍA CIVIL*

*DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA*

DEL DÍA 15 DE DICIEMBRE DEL 2011 AL 14 DE DICIEMBRE DEL 2016  
POR CUMPLIR CON LOS REQUISITOS DE CALIDAD EDUCATIVA  
ESTABLECIDOS POR EL CACEI.

México, D.F. a 15 de Diciembre del 2011

  
Ing. Fernando Osampo Canabal  
Presidente del Consejo Directivo

ACTA No. 1176

**BUAP** / **INGENIERÍA**  
FACULTAD



# Degradación de compuestos azufrados presentes en diésel y gasolina: La electroquímica como tecnología alternativa para su remoción

Andrea Becerra Córdoba, Erika Méndez Albores

## RESUMEN

La emisión de residuos contaminantes al medio ambiente debido a la actividad industrial ha generado un gran número de problemas debido a la presencia de compuestos de alta toxicidad. Dichos problemas ambientales han crecido de forma excesiva por lo que es necesario plantear soluciones para resarcir su daño continuo y ascendente. Ejemplo de ello lo constituyen los combustibles líquidos como diésel y gasolina que contienen compuestos orgánicos azufrados en su composición: como tiofenos, dibenzotiofenos y sus derivados alquilados, que por la técnica de hidrodesulfuración empleada en las refinerías como tratamiento convencional, no es posible removerlos en su totalidad. Como una consecuencia de esto, los productos de combustión de estos compuestos impactan al ambiente, principalmente a la atmósfera debido a su alta toxicidad biológica, a su persistencia en la biosfera y a la generación de lluvia ácida. Esta situación ha repercutido en las normas internacionales para el cuidado del ambiente, las cuales son cada vez más estrictas que promueven la búsqueda de nuevas alternativas para remover el azufre de los combustibles de forma parcial o total. Una alternativa prometedora lo constituye el proceso, denominado “desulfuración electroquímica”, que permite oxidar y/o reducir a las moléculas orgánicas cíclicas azufradas transformándolas en compuestos polares más fáciles de extraer. Por lo anterior, el presente documento describe la importancia ambiental que tiene el degradar compuestos azufrados presentes en combustibles líquidos como diésel y gasolina y analiza las recientes tecnologías alternas, como los métodos electroquímicos, para eliminar a los compuestos azufrados como el dibenzotiofeno y sus derivados alquilados que resultan recalcitrantes con la hidrodesulfuración.

**Palabras clave:** Contaminación ambiental, diésel, azufre, dibenzotiofeno, desulfuración electroquímica.

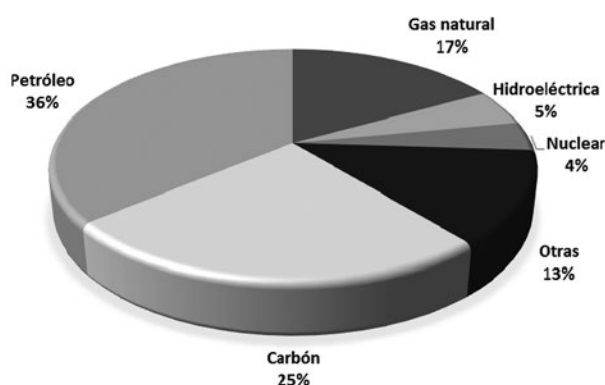
## ABSTRACT

Due to the industrial activity, the emission of pollutants to the environment has generated a large number of problems by the presence of toxic compounds. These environmental problems have grown excessively and it has been necessary to propose solutions to decrease its continued damage. An example of this situation are liquid fuels such as diesel and gasoline containing organic sulfur compounds such as thiophenes, dibenzothiophenes and their alkyl derivatives, which by the conventional hydrodesulfurization techniques employed in refineries, cannot be removed completely. These compounds impact the environment and the atmosphere due to its high biological toxicity, persistence in the biosphere and the generation of acid rain. They are difficult to mineralize and because of the stringent international standards for the protection of the environment, new alternatives to remove partially or completely the sulfur from fuels with good relationship cost/efficiency are desirable. A promising alternative is the use of electrochemical strategies like the “electrochemical desulfurization”, that allow oxidize or reduce the cyclic sulfur organic molecules changing them into more polar compounds. An advantage offered by electrochemical methods is that they can be operated at room temperature and pressure. Therefore, the aim of this article is present an overview of the environmental importance to degrade sulfur compounds present in liquid fuels such as diesel and gasoline. Particularly, recent electrochemical alternatives to remove sulfur compounds like dibenzothiophene and its alkyl derivatives, that are recalcitrant to conventional hydrodesulfurization, are presented.

**Keywords:** Environmental pollution, diesel, sulfur, dibenzothiophene, electrochemical desulfurization.

## 1 INTRODUCCIÓN

El petróleo es un recurso natural primordial empleado para la generación de energía en el planeta ya que constituye aproximadamente el 36% del total de energía que se consume (figura 1). Este recurso está constituido principalmente de una mezcla de hidrocarburos (85% carbono y 12% hidrógeno) y el resto con azufre, oxígeno, nitrógeno y elementos metálicos. La gasolina, el diésel, gasóleo, entre otros, son ejemplos de combustibles, o derivados del petróleo que se obtienen a partir de su refinamiento, que al igual que el petróleo crudo, contienen en su composición azufre aunque en menor proporción.



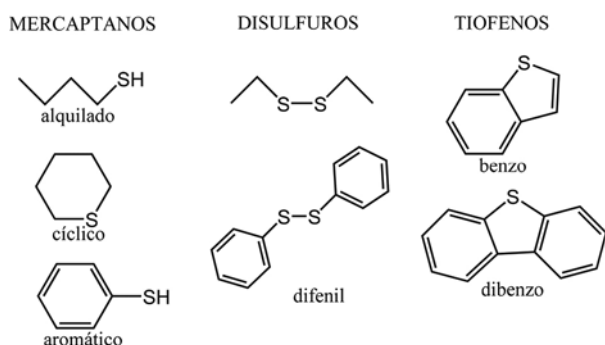
**Figura 1.** Fuentes primarias de energía a nivel mundial [1].

De los combustibles antes mencionados, el diésel está constituido por hidrocarburos cuyo contenido de carbono va de  $C_{12}$ - $C_{23}$  (hidrocarburos de fracción media). Contiene además, diversos compuestos aromáticos como los aromáticos polinucleares azufrados, nitrogenados, parafinas, olefinas y naftenos. La calidad de ignición se mide mediante el índice de cetano (n-hexadecano), equivalente al octano en la gasolina. Por su parte, la gasolina es una mezcla de hidrocarburos de fracción ligera que pueden poseer de  $C_4$  (butanos y butenos) hasta  $C_{11}$ , así como trazas de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno [2].

Un problema ambiental que presentan los combustibles antes mencionados, es que al llevar a cabo su combustión, se emiten a la atmósfera gases como

$SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  e hidrocarburos no quemados. De éstos, la cantidad de óxidos de azufre emitidos ( $SO_x$ ) está directamente relacionado con la cantidad de azufre presente en el combustible. Este residuo al entrar en contacto con otros componentes del aire puede generar ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), principal componente de la lluvia ácida, que ocasiona graves problemas de corrosión en los metales expuestos, además del daño que provoca a la salud de los seres vivos [3].

Entre los compuestos azufrados presentes en el petróleo se encuentran los polisulfuros (hidrocarburos cíclicos aromáticos), que generalmente están bajo la forma de mercaptanos, disulfuros, tiofenos como 2-metiltiofeno, 3-metiltiofeno, benzotiofenos, dibenzotiofenos y sus derivados alquilados (figura 2), los cuales son muy difíciles de remover [4]. De todos ellos, la familia de los tiofenos y sus derivados se encuentran presentes en los combustibles líquidos en mayor proporción.



**Figura 2.** Compuestos orgánicos azufrados presentes en el petróleo.

En México existen algunas normas internas que regulan la calidad del aire con respecto a las emisiones de gases emitidos por los automóviles e industrias. Por ejemplo, se tiene la norma NOM-086-ECOL-1994, que establece las especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se utilizan en las fuentes fijas y móviles. Esta norma evalúa la calidad del aire con respecto al dióxido de azufre ( $SO_2$ ), y establece que la gasolina y diésel deben contener un máximo de 30/80 ppmw (partes por millón en peso) de azufre en su composición [5, 6]. La norma NOM-051-ECOL-1993, establece el nivel máximo permisible en peso de azufre, en el gasóleo industrial que se consume en las fuentes establecidas en la zona metropolitana de la Ciudad de México [7].

Recibido 20 de mayo, 2014; aceptado 3 de julio, 2014

Andrea BECERRA CÓRDOBA

Correo electrónico: amonima\_andre@hotmail.com

Erika MÉNDEZ ALBORES

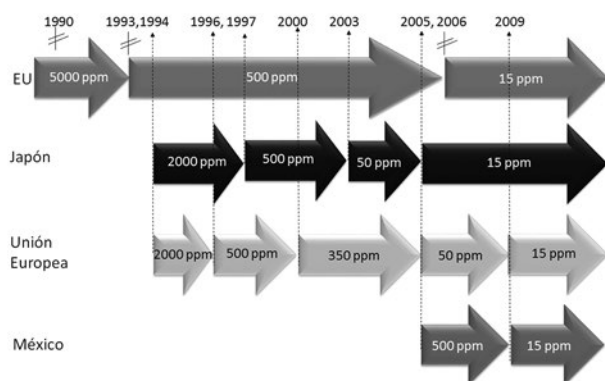
Correo electrónico: erika.mendez@correo.buap.mx

Tel: (222) 2295500 Ext 7399

Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Puebla, CU, San Claudio s/n, Edif 105I. Lab. de Inv. Electroquímica.

C.P 72570 Puebla, Pue., México

La preocupación por la presencia de azufre en el medio ambiente no es solo nacional, ya que países de todo el mundo han señalado la importancia de disminuir el contenido de azufre en los combustibles con la finalidad de reducir las emisiones de dicho componente y sus derivados a la atmósfera. Dichas regulaciones medioambientales están siendo aplicadas en muchos países de manera estricta para reducir los niveles de azufre en el diésel y otros combustibles hasta conseguir el objetivo que es su eliminación [8]. Es así como el límite de azufre en combustibles líquidos como el diésel ha pasado de 50 ppm [9] hasta 10 ppm y/o menos. En el año 2000, la Organización de Estándares Europeos, al igual que Japón y Canadá, impusieron un máximo de 50 ppmw y programaron una nueva especificación para el año 2009 de 10 ppmw (figura 3). Por su parte, la EPA (Environmental Protection Agency), estableció que los estándares finales de azufre en diésel y gasolina se reduzcan para el 2017 en más de 60%, pasando de 30 a 10 partes por millón (ppmw) [10].



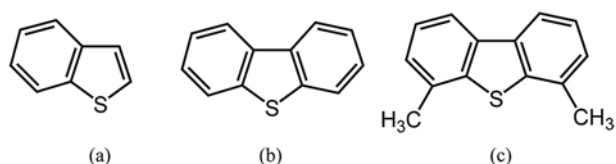
**Figura 3.** Tendencias en las especificaciones de azufre en diésel para vehículos de transporte [11, 12].

Por lo anterior, la solución a dicho problema se ha enfocado directamente a la desulfuración de los combustibles líquidos. Por lo que este tema no solo ha recibido considerable atención en la comunidad científica a nivel mundial, sino también a nivel nacional y regional, llegando a ser importante en las refinerías de petróleo del país, donde la eliminación de compuestos azufrados representa un reto operacional y económico [13, 14]. De este modo, se espera obtener combustibles con un bajo contenido de azufre, no solamente para reducir las emisiones en vehículos e industria sino también para prolongar la vida útil de los motores.

## 2 COMPUESTOS AZUFRADOS PRESENTES EN LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

El azufre es el heteroátomo más abundante en el petróleo crudo. Su concentración puede variar entre el 0.1% y más del 8% en peso. Este contenido está relacionado con la densidad del crudo y por lo tanto, con su calidad, si es ligero o pesado.

Los tiofenos y sus derivados, sobre todo aquellos que tienen un punto de ebullición mayor a 200°C, constituyen un grupo importante de compuestos azufrados presentes en combustibles líquidos. En estos, el azufre se ubica en ciclos aromáticos, como por ejemplo: el benzotiofeno (BT), el dibenzotiofeno (DBT) y 4,6-dimetildibenzotiofeno (DMDBT) (figura 4). Todos ellos presentan: olor desagradable, son nocivos porque generan SO<sub>2</sub> durante su combustión y envenenan los catalizadores durante el método empleado para la desulfuración catalítica [15].



**Figura 4.** Estructura química del (a) benzotiofeno (BT), (b) dibenzotiofeno (DBT) y 4,6 dimetildibenzotiofeno (DMDBT).

Su distribución en los combustibles líquidos depende del tipo de petróleo empleado como fuente primaria. Por mencionar un ejemplo, Wang y col. (2007) analizaron la distribución de azufre en una muestra de gasolina que contenía 310 ppmw de acuerdo a la temperatura de ebullición, encontrando lo que se presenta en la tabla 1 [16].

En esta tabla se puede apreciar que el tipo y cantidad de compuestos azufrados depende en gran medida del origen del combustible, lo cual a su vez influencia la temperatura de ebullición. Por lo anterior, el conocimiento de las formas en que el azufre se puede encontrar en un combustible resulta importante para elegir la alternativa tecnológica adecuada para su remoción.

## 3 DESULFURACIÓN CONVENCIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

En la actualidad resulta complicado lograr bajos contenidos de azufre debido a que el crudo que se emplea como materia prima contiene grandes proporciones de azufre y viene catalogado como “muy pesado”. Esto provoca que los combustibles sigan teniendo

**Tabla 1.** Distribución de azufre en una muestra de gasolina de acuerdo al punto de ebullición.

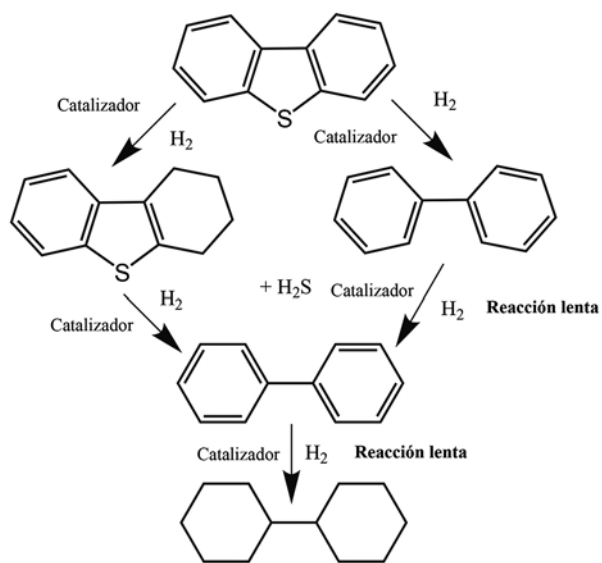
Rango de Temperatura de ebullición (°C)	Distribución de azufre (%)	Especies azufradas localizadas	Contenido de azufre (ppmw)
<60	11.56	Mercaptano	35.84
60-80	8.67	Mercaptano	26.88
80-90	4.33	Mercaptano-Tioéter	13.43
90-100	6.63	Mercaptano-Tioéter	20.55
100-110	10.87	Tioéter-Tiofeno	33.69
110-120	8.67	Tioéter-Tiofeno	26.88
120-130	8.04	Tioéter-Tiofeno	24.92
>130	41.23	Tioéter-Tiofeno	127.81

altos niveles de azufre aun cuando en el primer y segundo proceso de destilación se elimina la mayor cantidad de éste [17].

Dentro de los métodos más comunes que las refinerías emplean para desulfurar se encuentra la “hidrodesulfuración”, en donde el enlace carbono-azufre (C-S) se rompe por hidrogenólisis para producir ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ). A partir de 1986, México comenzó con la actividad de reducir la concentración de azufre en el llamado diésel nacional, logrando en ese entonces bajarlo a 5000 ppmw. En la actualidad, se produce diésel con 500 ppmw mediante el proceso llamado hidrodesulfuración, pero lo que se busca es reducirlo a 10 ppm o menos, tal como se hace en otros países [16].

La hidrodesulfuración ha resultado ser efectiva para tioles y sulfuros, pero poco efectivas para algunos compuestos tiofénicos como el benzotiofeno, dibenzotiofeno y sus derivados alquilados (figura 4) [18]. Dicha deficiencia radica en la aromaticidad del anillo tiofénico presente en los compuestos y al impedimento estérico de los sustituyentes alquilo, los cuales ocasionan que la ruptura de un enlace carbono-azufre (C-S) y la accesibilidad del átomo de azufre a los sitios activos del catalizador sean difíciles. Debido a que durante el proceso de hidrodesulfuración ocurren reacciones secundarias como la hidrogenación y el fraccionamiento, se hace necesario el uso de altas concentraciones de hidrógeno ( $H_2$ ) y condiciones experimentales drásticas. En este sentido, durante la hidrodesulfuración se involucra el uso de catalizadores químicos con contenido de metales a altas presiones (3-10MPa) y elevadas temperaturas (360°C hasta 425°C), donde el catalizador frecuentemente empleado es de Co-Mo/ $Al_2O_3$  o Ni-Mo/ $Al_2O_3$ . Compuestos como el dibenzotiofeno y sus derivados alquilados han mostrado ser recalcitrantes con la aplicación de esta tecnología, por lo que resultan difíciles de convertir a  $H_2S$  [19, 20]. Otra desventaja de esta técnica, además de la parcial

eliminación de azufre (figura 5), es el envenenamiento del catalizador debido a la formación de compuestos organometálicos.

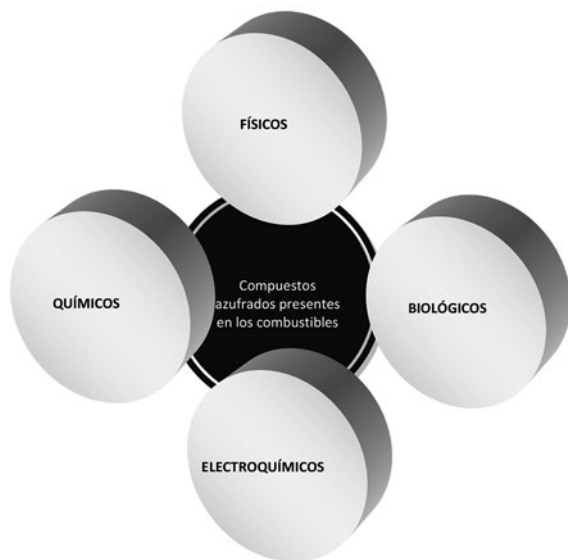


**Figura 5.** Mecanismo que sigue el proceso de desulfuración para el dibenzotiofeno por hidrodesulfuración.

Debido a que el dibenzotiofeno y dimetildibenzotiofeno son difíciles de degradar por hidrodesulfuración, se han propuesto numerosas alternativas para lograr eliminarlos. De esta manera otras tecnologías han hecho su aparición como: la desulfuración oxidativa, biodesulfuración, desulfuración adsortiva, desulfuración extractiva, la desulfuración por alquilación, entre otros. Recientemente, el empleo de métodos electroquímicos se presenta como una alternativa viable en términos de costo-eficiencia, que no solo es capaz de desulfurar sino también de transformar a moléculas azufradas con mayor capacidad de degradación y/o remoción por su polaridad.

#### 4 ALTERNATIVAS EMPLEADAS PARA DESULFURAR (TENDENCIAS ACTUALES)

Además de la hidrosulfuración, en los últimos años se han desarrollado diferentes métodos para degradar compuestos azufrados como los tiofenos, dibenzotiofenos y compuestos menos tóxicos como el dibenzotiofeno sulfona (DBTO<sub>2</sub>), siendo este último, un compuesto que procede de la oxidación del dibenzotiofeno (figura 6).



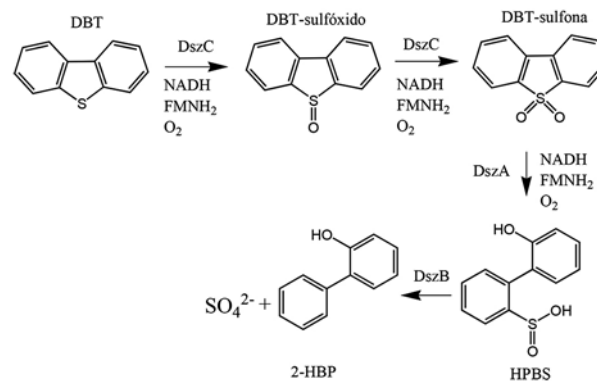
**Figura 6.** Clasificación de los métodos mayormente empleados en la desulfuración de combustibles.

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas intrínsecas y su aplicación puede obedecer a circunstancias socio-económicas y geográficas muy particulares, por lo que a continuación se describen brevemente los aspectos esenciales de cada uno, mencionando ejemplos de aplicación.

**Métodos biológicos:** Son procesos en donde se emplean microorganismos para remover compuestos azufrados del medio. Se basa en la capacidad de ciertos microorganismos para oxidar a dichos compuestos y transformarlos en otros de fácil eliminación. Este proceso posee ventajas como: bajos costos de inversión-operación y menor consumo energético. Sin embargo, es un proceso muy lento, lo que hace necesaria la búsqueda de nuevos microorganismos que reduzcan los tiempos de residencia y hagan más competitivo el proceso a nivel industrial. Para llevar a cabo la biodesulfuración se emplean bacterias (bacilos, espirales, cocos y células filamentosas). Algunos ejemplos de estas son la *Thiobacillus*, la *Sulfolobus*, la *Acidianus* y la *Thiospira*. Para la desulfuración

del DBT se han empleado principalmente microorganismos del género de *Rhodococcus* como *Rhodococcus sp* SY1, *R. erythropolis* D-1, *R. erythropolis* H-2, *R. erythropolis* N1-36, *R. erythropolis* KA2-5-1, *Rhodococcus sp.* T09, *Rhodococcus sp.* P32C1, y otros microorganismos como *Pseudomonas*, *Gordona* y *Brevibacterium*. Se han probado también microorganismos mesofílicos y termofílicos. Se ha visto que por medio de *Rhodococcus* se puede transformar al DBT en 2-hidroxibifenilo y sulfato por medio del mecanismo denominado 4S, donde se emplean tres enzimas, DszA, DszB y DszC, localizadas en el operón que codifica el plásmido dsz (figura 7) [21, 22].

Lo que sucede en la conocida ruta 4S, es que dentro de los procesos biológicos se tiene el empleo de *biocatalizadores* (nombre genérico que define todos los procesos donde microorganismos aumentan la velocidad de la reacción de desulfuración), los cuales remueven las moléculas recalcitrantes bajo condiciones suaves de presión y temperatura. Por lo que microorganismos aerobios, anaerobios y anaeróbicos facultativos han sido efectivos en la degradación de DBT y sus análogos. De esta manera, el biocatalizador remueve selectivamente al azufre del DBT, dejando intacto al esqueleto de carbón, como se aprecia en la ruta 4S (figura 7) [23, 24].



**Figura 7.** Mecanismo de acción de los microorganismos 4S en la biodegradación del DBT, donde NADH es nicotinamida adenina dinucleótido, FMNH<sub>2</sub> es la forma reducida de la flavina mononucleótido, O<sub>2</sub> es oxígeno molecular, 2-HBP es 2-hidroxibifenilo y HPBS es 2-(2'-hidroxibifenil-benceno sulfonato).

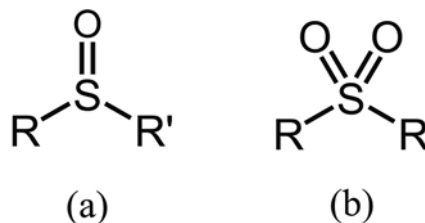
**Métodos físicos:** La característica principal de estos métodos radica en la separación de los componentes de una fase y no en su modificación. Por ejemplo, si es necesario hacer una separación de fases se procederá a realizar una extracción líquido-líquido o si el componente indeseable se puede retener en una matriz porosa se recurrirá a una adsorción. Este último

es un tratamiento muy prometedor, ya que el empleo de una superficie reactiva puede remover el derivado azufrado por completo en el combustible siempre que se usen los adsorbentes apropiados. De este modo, la elección de un adsorbente para la desulfuración total es de importancia puesto que el material tiene que proveer una superficie activa con una gran porosidad y tamaño adecuado. Ejemplo de ello son los carbones activados, cuya superficie micro/mesoporosa puede ser modificada a través de varios métodos [25, 26]. De esta manera, la porosidad juega un papel muy importante en un proceso de adsorción, especialmente los poros menores a 1nm ya que son similares al tamaño de una molécula del dibenzotiofeno [27]. Por lo anterior, las interacciones fuertes adsorbato-adsorbente que pueden existir en un nanospacio confinado impulsan el proceso de eliminación de compuestos azufrados. Esta fuerte atracción entre las moléculas en la superficie, puede resultar adicionalmente en una transformación química a otras especies que también podrían ser adsorbidas en la superficie. Este proceso se llama adsorción reactiva donde las moléculas primero son adsorbidas en la superficie del sistema y luego, debido a la interacción química con la superficie, son convertidas en otras especies [28, 29].

**Métodos químicos:** Los tratamientos químicos comprenden distintas reacciones donde existe una modificación de la estructura molecular de los componentes no deseados, destruyéndolos o reduciendo su movilidad. Estos métodos abarcan una gran lista de procesos. Se puede citar a la desulfuración oxidativa, que ha sido considerada prometedora ya que puede ser llevada a cabo bajo condiciones suaves de temperatura y presión, además de los bajos costos que involucra si se le compara con el proceso de hidrodesulfuración [30]. Entre los oxidantes mayormente empleados se citan al reactivo de Fenton (radicales hidroxilo,  $\bullet\text{OH}$ ), que se generan de la reacción del peróxido de hidrógeno con catalizadores. Este radical, también se puede obtener de otras formas, entre las que se destaca la fotocatalisis o mediante energía ultrasónica. Al respecto, Akbari y col. (2014) obtuvieron más del 98% de conversión del azufre al combinar energía ultrasónica y catalizadores [31]. Otros oxidantes que también se han empleado son el ozono, oxígeno, hidroxiperóxido, peróxidos orgánicos, y oxidantes inorgánicos como el peróxido de hidrógeno.

Los productos de oxidación que se generan de los compuestos azufrados generalmente son las sulfonas y/o los sulfóxidos (figura 8), compuestos que dependen de la naturaleza de los compuestos azufrados y

las condiciones de oxidación. Estos productos son más polares que los iniciales y pueden ser extraídos eficientemente con algunos disolventes polares como acetonitrilo y alcohol o pasándola a través de una columna iónica para luego aplicar operaciones de separación convencionales (extracción, destilación, etc.) [32, 33, 34]. De esta manera, lo que se busca con la desulfuración oxidativa es convertir los sulfuros a sulfonas para después removerlos por procesos físicos como extracción [35].



**Figura 8.** Estructura química del grupo (a) sulfóxido y (b) sulfona.

Otra alternativa de proceso químico es el uso de los líquidos iónicos, también llamados “solventes verdes” [36]. Este método de desulfuración combinado con  $\text{H}_2\text{O}_2$  ha sido el más efectivo. Sin embargo, el inconveniente que presentan estos procesos es que requieren de tiempos muy largos de reacción, por lo que se está experimentando incluir catalizadores para hacer la desulfuración más eficiente. Un ejemplo de ello fue el realizado por Jianga y col. (2014) [37] quienes pudieron desulfurar el 97.1% empleando una nueva familia de catalizadores como el tetracloroferrato de dialquilpiperidinio  $[\text{C4mpip}]\text{FeCl}_4$  presente en un líquido iónico  $[\text{C8mim}]\text{BF}_4$  a  $30^\circ\text{C}$  durante 60 minutos. Donde la proporción molar de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )/ azufre (S) fue 3.5:1 en peso.

Otro ejemplo de alternativa química, es la eliminación de azufre con agua supercrítica, muy usada en el tratamiento del petróleo pesado [38, 39]. Es un buen disolvente para promover la eliminación de heteroátomos con enlaces carbono-oxígeno (C-O) y carbono-azufre (C-S) [40, 41]. El agua supercrítica es un disolvente no polar que tiene la habilidad de disolver compuestos orgánicos que incluyen a la mayoría de los componentes del petróleo como gases permanentes. En algunos casos la velocidad de reacción y la distribución del producto pueden ser manipuladas ajustando las condiciones de la reacción [42]. Las discrepancias en la literatura sobre la efectividad del método han sido atribuidas a las diferencias en la respuesta al proceso de los compuestos de azufre que



han sido estudiados. De esta manera, se ha visto que los compuestos azufrados no aromáticos, incluyendo los tioles, se rompen rápidamente en agua supercrítica, y que los compuestos aromáticos de azufre son más estables, por lo que el uso de catalizadores como los óxidos de Ce, Co, Fe, Mn, Ti, Mo, y Zn han sido requeridos en estos procesos [43, 44, 45]. Un inconveniente que presenta el uso de agua supercrítica es que el azufre puede envenenar a los metales del catalizador [46, 47].

De esta manera, en la búsqueda de nuevas alternativas que cumplan con bajo costo y alta eficiencia en la remoción de azufre, se han considerado también a los métodos de electrolisis, que se clasifican dentro de los procesos químicos, en los cuales las transformaciones químicas son producidas por el paso de una corriente eléctrica.

**Métodos electroquímicos:** Los métodos electroquímicos empleados para degradar contaminantes presentes en medios líquidos como en la desulfuración de aceites derivados del petróleo, se clasifican en: (a) métodos estáticos, donde se impone una corriente o un potencial constante y (b) métodos dinámicos, donde se pueden emplear microorganismos dentro de un sistema electroquímico.

Los sistemas empleados para llevar a cabo procesos electroquímicos son muy sencillos, ya que se emplean dos electrodos (ánodo y cátodo), un medio electrolítico conductor (solvente más una sal) y estos deben de estar conectados a una fuente de energía que suministre corriente o potencial al sistema.

Los métodos electroquímicos permiten mejorar muchos de los procesos que existen actualmente en cuanto a la degradación de compuestos orgánicos ya sea oxidándolos o reduciéndolos de manera directa o indirecta. La directa se refiere a una transferencia de electrones en la interfase del electrodo mientras que la indirecta se da a través de la generación *in situ* de algún oxidante como el ozono, peróxido de hidrógeno, cloro, hipoclorito, dióxido de cloro y radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), entre otros.

Dentro de las ventajas que se pueden mencionar respecto al empleo de métodos electroquímicos, se pueden considerar:

- No requiere de un gasto energético excesivo: eficiencia termodinámica.
- Tiene un costo accesible ya que el mantenimiento del material es sencillo, además de que se puede trabajar en condiciones de presión y temperatura normales.

- El sistema electroquímico es versátil y se puede emplear para degradar distintos compuestos tóxicos.
- Las variables que se manejan son intensidad de corriente y voltaje, por lo que su automatización y diseño resulta sencillo.
- En condiciones experimentales adecuadas, se obtienen procesos sumamente selectivos y se evita desperdiciar energía al disminuir la generación de subproductos.

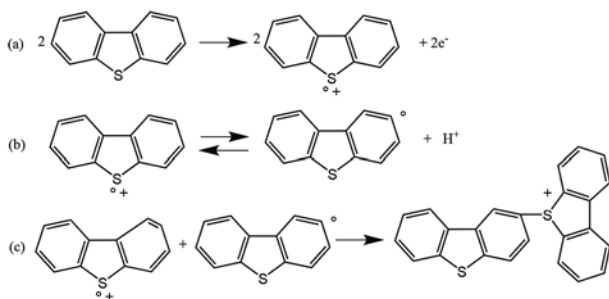
Un punto importante a considerar en los procesos electroquímicos es el medio electrolítico a emplear, ya que la solubilidad en fase acuosa de la mayoría de los compuestos orgánicos es baja. Al respecto, Bontempelli y col. (1973) [48] experimentaron con la reducción del cloruro de bencensufenilo en disolventes apróticos, empleando como cátodo al platino sumergido en acetonitrilo. Para este propósito, la voltamperometría cíclica y coulombimetría a potencial controlado fueron las técnicas principalmente empleadas.

En el caso particular de la remoción de compuestos azufrados, después del proceso de electrolisis exhaustiva, se procede a implementar un procedimiento adecuado de extracción con algún disolvente, que puede ser la dimetilformida y acetonitrilo, que permiten la remoción de los sulfóxidos o las sulfonas principalmente generadas (figura 8). Esto es debido a que dichos compuestos presentan baja solubilidad en agua (tabla 2) [49].

**Tabla 2.** Solubilidad en agua de algunos compuestos azufrados a 24°C en mg L-1 y mM.

	Solubilidad de algunos derivados azufrados y sus productos de oxidación	
	Solubilidad en agua (24 ± 2°C)	
	mg L-1	mM
	Intervalo	Intervalo
Benzotiofeno	150-162	1.12-1.22
Benzotiofeno sulfona	500-580	3.15-3.65
3-Metilbenzotiofeno	49-49	0.33-0.33
3-Metilbenzotiofeno sulfona	345-422	1.95-2.38
5-Metilbenzotiofeno	41-52	0.27-0.35
5-Metilbenzotiofeno sulfona	392-405	2.16-2.23
Dibenzotiofeno	0.9-1.2	0.0055-0.0073
Dibenzotiofeno sulfóxido	324-236	1.59-1.61
Dibenzotiofeno sulfona	5.7-5.8	0.026-0.028

De acuerdo a la tabla 2, se puede ver que el compuesto que presenta la más baja solubilidad en agua es el dibenzotiofeno, por lo que crea un problema para su estudio en medios acuosos. Razón por la cual los estudios electroquímicos existentes han sido en medios no acuosos empleando acetonitrilo con alguna sal cuaternaria de amonio como electrolito soporte [48]. De acuerdo a Bontempelli y col. (1973) [48] (figura 9a), al momento de electrolizar el sistema lo que puede ocurrir es una dimerización (figura 9b-c). Sin embargo, aún falta ahondar más sobre este estudio para aseverar tal situación, ya que para conocer y evaluar cualquier proceso aplicado para degradar al dibenzotiofeno o sus derivados alquilados, se requiere de una técnica analítica que logre no solo identificar sino también cuantificar la cantidad de subproductos remanentes que quedan en el caso de no alcanzar la mineralización. Los instrumentos mayormente empleados para tal efecto han sido la cromatografía de líquidos de alta presión acoplada a espectrometría de masas (HPLC) y la de gases (CG), siendo este último más útil cuando se trata de analizar compuestos orgánicos poliaromáticos.



**Figura 9.** Mecanismo de oxidación del DBT por técnicas electroquímicas.

La oxidación electroquímica de compuestos azufrados se ha explorado poco a nivel mundial. Dentro de los métodos electroquímicos que se han aplicado para degradar compuestos azufrados, se tiene la remoción de tiofenos, con el empleo de líquidos iónicos y el uso de electrocatalizadores sobre carbón vítreo y platino [16, 50].

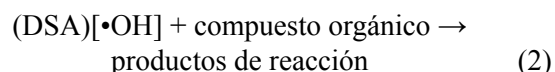
En definitiva, el material del electrodo en un factor que puede influenciar el mecanismo. Este parámetro es una de las piezas principales a considerar cuando se trabaja con oxidaciones y/o reducciones electroquímicas de compuestos orgánicos.

Uno de los materiales electródicos que ha tomado auge en los últimos años es el empleo mayoritario de ánodos dimensionalmente estables, *Dimensionally Stable Anodes* (DSA) por sus siglas en inglés, que

son capaces de generar radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) en medio acuoso. La generación del radical hidroxilo sobre estos materiales electródicos se da a través de la reacción de oxidación del agua de acuerdo a la reacción 1, donde M es el sustrato [51].

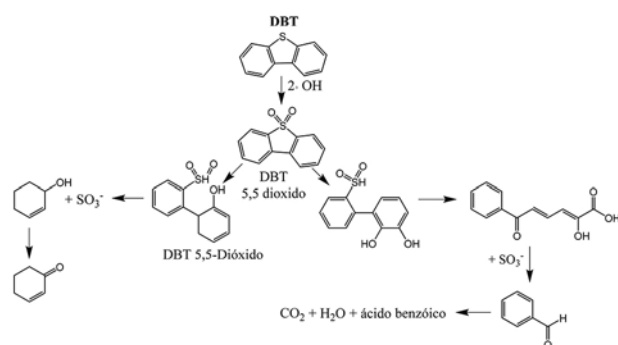


Estos radicales son altamente reactivos, se forman masivamente sobre la superficie de los electrodos DSA y eventualmente pueden reaccionar con la materia orgánica de acuerdo a la reacción 2, o bien, paralelamente, pueden dimerizar para formar  $\text{H}_2\text{O}_2$ , que también es una especie altamente oxidante.



El material base de los electrodos DSA es por lo general un sustrato de titanio metálico recubierto con una película de óxidos que pueden ser de  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{PbO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ , entre otros, que actúan como electrocatalizadores en el desprendimiento de  $\text{O}_2$  y de radicales hidroxilo. La denominación “estable” de estos electrodos se debe a que no sufren modificaciones en sus dimensiones durante el proceso, a diferencia de otros materiales que se corroen o devastan con el uso. Otro de los electrodos que actualmente ha incrementado su uso, a pesar de su costo, son los electrodos de diamante dopados con boro (Boron Doped Diamond, BDD), poseen una ventana de potencial electroquímica mayor que los anteriores y son muy resistentes a la corrosión. Por otro lado, se ha visto que el BDD tiene poca habilidad de adsorción, por lo que permite mayor generación de radicales  $\bullet\text{OH}$  y por consiguiente tiene mayor capacidad para degradar a los compuestos orgánicos.

Consecuentemente dependiendo del metal noble empleado en los DSA, puede haber variación en los productos obtenidos de una reacción anódica. Sin embargo, de manera general, se ha propuesto que la oxidación de moléculas orgánicas aromáticas comienza por un ataque electrofílico de los radicales hidroxilo sobre el anillo aromático hasta producir ácidos alifáticos, aldehídos y cetonas, que son los que finalmente sufren mineralización y se convierten en  $\text{CO}_2$ . En cuanto al ataque del radical hidroxilo sobre el DBT, el mecanismo disponible actualmente es el de Vargas y col. (2008) [52] cuya ruta se basa en la desulfuración metabólica sugerida por Van Afferden y col. (1990) [53], donde el compuesto benzaldehído fue detectado como principal subproducto de degradación y en menor cantidad se detectó ácido benzoico, 2-ciclohexeno-1-ol y 2 ciclohexeno 1-ona (figura 10).



**Figura 10.** Mecanismo de degradación del DBT por radicales hidroxilo [52].

Entre otros ejemplos de aplicación de los electrodos DSA, se pueden citar a la degradación de fenol empleando Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb, Ti/RuO<sub>2</sub>, y Pt, donde el fenol fue mineralizado mayormente sobre Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb, aunque fue más lenta que sobre Ti/RuO<sub>2</sub> y a su vez

sobre platino [54]. Feng y col. (2003) [55] investigaron el uso de Ti|TiO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> para remover amonio. Tanaka y col. (2003) [56] demostró la efectividad del Ti|RuO<sub>2</sub> y Pt para degradar compuestos orgánicos contenidos en lixiviados, pero los ánodos no manifestaron largas vidas. Con electrodos de PbO<sub>2</sub> el fenol pudo ser removido, pero lo descartaron debido a la posible contaminación con Pb, Miao y col. (2009) [57] trabajaron con fenol empleando Ti/RuO<sub>2</sub>-Pt and Ti/IrO<sub>2</sub>-Pt.

#### 4 AVANCES EN LA DESULFURACIÓN DEL BT, DBT Y 4,6 DMDBT

La desulfuración de algunos derivados azufrados se ha documentado previamente y algunos detalles se presentan en la tabla 3, en donde se comparan los porcentajes de remoción que se ha obtenido empleando diversos métodos de tratamiento.

**Tabla 3.** Porcentajes de remoción de azufre en combustibles líquidos sintéticos empleado diversos métodos de desulfuración.

Método	Contaminante	% de remoción	Condiciones operacionales	Ref
Biodesulfuración	DBT y DMDBT	DBT= 93%	Bacteria mesofílica: <i>Pantoea agglomerans</i> D23W3	58
		DMDBT=26.4-71.4%		59
	DBT	75%	<i>Rhodococcus erythropolis</i> IGTS8	60
Hidrodesulfuración	BT y DBT	93-97%	320°C, 5MPa Empleando NiW-CA/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >NiW-P/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >NiW/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . NiW-P/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61
	4,6 DMDBT	80.3%	Catalizadores de Níquel, Cobre, y Molibdeno a 315°C y 8MPa,	62
		>90%	Catalizadores NiB a 350°C y 6MPa	63
Oxidación catalítica	BT y DBT	>92%	Oxisales inorgánicas K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , KMnO <sub>4</sub> ó NaClO <sub>4</sub> y ácidos de Lewis FeCl <sub>3</sub> , ZnCl <sub>2</sub> o CuCl <sub>2</sub>	64
	DBT	99.1%	Catalizador W/D152 con peróxido de ciclohexanona	65
	BT y 4,6 DMDBT	>99%	Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> , 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	66
	DBT	>99%	Peróxido de hidrógeno con bis(acetilacetato)oxovanadio(IV)	67
Electroquímico	DBT	90%	Celda dividida. El combustible se alimentó al cátodo previamente calentado y presurizado para ser electroreducido a H <sub>2</sub> S.	68
		94%	Reducción a -4.5V sobre acero inoxidable como electrodo, se empleó hexafluorofosfato de tetrabutilamonio como electrolito	69

De acuerdo a la tabla 3, se puede observar que aquellos que emplearon la desulfuración electroquímica mostraron tener eficiencias mayores del 90%, valores comparables con los otros métodos aplicados. Se puede observar también, algunas desventajas que presentan los métodos descritos. Por ejemplo, la biodesulfuración requiere de tiempos largos de residencia y los porcentajes de remoción son bajos (entre 70 a 75%). La hidrodesulfuración ocupa temperaturas de trabajo por arriba de los 300°C y presiones mayores de 5 MPa. En cuanto a la oxidación catalítica, estos métodos alcanzaron los mejores porcentajes de remoción, sin embargo, el inconveniente es el uso de catalizadores y oxidantes muy potentes que pueden resultar económicamente no viables ni de fácil acceso. La desventaja de los métodos electroquímicos es que no han sido explorados lo suficiente, mostrando hasta ahora que únicamente se requiere controlar la aplicación de una corriente o potencial eléctrico y elegir bien el material del electrodo para obtener mejores remociones a tiempos cortos.

Por lo anterior, con esta información, se abre una interesante perspectiva para seguir investigando las condiciones de operación en los métodos electroquímicos para mejorarlos o en su defecto combinarlos con otros procesos para alcanzar remociones más eficientes. Ya que independientemente del método aplicado, resulta importante evaluar ciertas condiciones de operación como: presión y temperatura aplicada, tiempo de residencia, requerimiento energético, impacto ambiental, entre otros, antes de elegir un proceso en particular.

## 5 CONCLUSIONES

A pesar de que en el mercado ya existen medios de transporte que trabajan con combustibles alternativos y que no dependen de los combustibles derivados del petróleo, la mayoría de los vehículos que existen operan aún con motores de combustión interna. Sin embargo, resulta difícil, en términos económicos, dejar obsoletas a aquellas empresas donde el actual flujo de energía es controlada por empresas petrolíferas. Por lo que el petróleo sigue y seguirá siendo la fuente principal de energía en todo el mundo y sobre todo en nuestro país, México.

Por lo anterior, el quehacer de buscar nuevas alternativas para desulfurar a los combustibles líquidos como diésel y gasolina tiene aún relevancia a nivel mundial y regional. Por lo que día a día se investi-

gan y se desarrollan nuevas tecnologías en pro del cuidado del medio ambiente tratando de reducir los niveles de SO<sub>2</sub> que se emiten a la atmósfera. Sin embargo, a pesar de que las nuevas alternativas que se han desarrollado logran remover buenos porcentajes de azufre, aún queda trabajo por hacer para escalar lo obtenido a nivel laboratorio y llevarlo a la práctica en escalas industriales.

En lo que respecta al tratamiento convencional que es la hidrodesulfuración, esta tecnología es costosa para las refinerías ya que emplean temperaturas elevadas y altas presiones, con uso de reactores de gran volumen y cantidades elevadas de catalizadores. Además de que con esta tecnología es poco probable que se reduzca el azufre en menos de 15 ppmw, sobre todo cuando se tiene DBT y DMDBT.

Se ha demostrado que la tendencia para los compuestos de azufre en cuanto a la reactividad para su oxidación en ácido fórmico/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es: metil-fenil sulfito > tiofenol > difenil sulfito > 4,6-dimetil dibenzotiofeno > 4-metildibenzotiofeno > dibenzotiofeno > benzotiofeno > tiofeno. Esta tendencia confirma que los compuestos que son refractarios en la hidrodesulfuración son los más reactivos en la reacción de oxidación.

De esta manera, se puede decir que no existe una tecnología infalible que logre eliminar por completo el azufre de los combustibles reales ya que todos poseen intrínsecamente ventajas y desventajas, por lo que es necesario hacer mejoras en los métodos ya propuestos o buscar nuevos y mejores arreglos que permitan dicho fin. En este sentido, las tecnologías que hacen uso de la electroquímica resultan prometedoras, técnico/económicamente hablando, ya que operan a temperaturas y presiones ambientales. Es decir, se requieren condiciones mucho más suaves y no se necesita el consumo de H<sub>2</sub>. Incluso esta tecnología puede aplicarse como un proceso adicional en la hidrodesulfuración, situación que posiciona a los métodos electroquímicos con una ventaja para eliminar el azufre de los combustibles líquidos.

## REFERENCIAS

- [1] Fuentes primarias de energía a nivel mundial: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/08\\_lecciones/01\\_leccion/www/riesgos\\_del\\_sistema\\_energetico\\_a.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/08_lecciones/01_leccion/www/riesgos_del_sistema_energetico_a.htm)
- [2] NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

- [3] Yang R.T., Hernández-Maldonado A.J., Yang F.H. (2003). Desulfurization of transportation fuels with zeolites under ambient conditions, *Science* 301, 79–81.
- [4] Long Z., Yang C., Zeng G., Peng L., Dai C., He H., (2014). Catalytic oxidative desulfurization of dibenzothiophene using catalyst of tungsten supported on resin D152. *Fuel* 130, 19–24.
- [5] NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-086-ECOL-1994.
- [6] NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-022-SSA1-1993.
- [7] NORMA OFICIAL MEXICANA: NOM-051-ECOL-1993.
- [8] US EPA. Regulatory announcement: heavy-duty engine and vehicle standards and highway diesel fuel sulfur control requirements; 2000.
- [9] Turaga U.T., Choudhary T.V., Conocophillips Company, USA, WO2006053135 A2 (2006).
- [10] <http://www.epa.gov>
- [11] Stanislaus A., Marafi A., Rana M. S., (2010). Recent advances in the science and technology of ultra low sulfur diesel (ULSD). *Production. Catalysis Today* 153, 1–68.
- [12] <http://www.ref.pemex.com/octanaje/o66/o.htm>
- [13] Breyse M, Diega-Mariadassou G, Pessayre S, Geantet G, Vrinet M, Lemaire M, (2003). Deep desulfurization: reactions, catalysts and technological challenges. *Catalysis Today* 84,129–38.
- [14] Srivastava V.C, (2012). An evaluation of desulfurization technologies for sulfur removal from liquid fuels. *Rsc Advances* 2,759–83.
- [15] Wauquier J.P., (1994). *El Refino Del Petróleo: Petróleo Crudo, Productos Petrolíferos, Esquemas de fabricación*. Editorial Díaz de Santos, España.
- [16] Wang W., Wang S., Liu H., Wang Z. (2007). Desulfurization of gasoline by a new method of electrochemical catalytic oxidation. *Fuel* 86, 2747–2753.
- [17] Bhatia S., Sharma D.K., (2006). Emerging role of biorefining of heavier crude oils and integration of biorefining with petroleum refineries in future, *Petroleum Science Technology* 24, 1125–1159.
- [18] Songa H., Gaoa J., Chena X., Hea J., Li C., (2013). Catalytic oxidation-extractive desulfurization for model oil using inorganic oxysalts as oxidant and Lewis acid-organic acid mixture as catalyst and extractant. *Applied Catalysis A: General* 456, 67– 74.
- [19] Chen H., Cai Y.B., Zhang W.J., Li W., (2009). Methoxylation pathway in biodesulfurization of model organosulfur compounds with *Mycobacterium* sp., *Bioresource Technology* 100, 2085–2087.
- [20] Zepeda T.A., Pawelec B., Díaz de León J.N., De los Reyes J.A, Olivás A, (2012). Effect of gallium loading on the hydrodesulfurization activity of unsupported Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/WS<sub>2</sub> catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* 111-112, 10-19.
- [21] Del Olmo C.H., Alcon A., Santos V.E., García-Ochoa F, (2005). Modeling the production of a *Rhodococcus erythropolis* IGTS8 biocatalyst for DBT biodesulfurization: Influence of media composition. *Enzyme and Microbial Technology* 37, 157-166.
- [22] Pérez H., Villa P., (2005). Desulfuración Biológica: Una Alternativa para el Tratamiento de Emisiones de Gases a la Atmósfera. *Agua latinoamericana* 5, 17-20.
- [23] Kodama K., Umehara K., Shimizu K., Nakatani S., Minoda Y., Yamada K, (1973). Identification of microbial products from dibenzothiophene and its proposed oxidation pathway. *Agricultural and Biological Chemistry* 37, 45-50.
- [24] Denome S.A., Olson E.S., Young K.D, (1993). Identification and cloning of genes involved in specific desulfurization of dibenzothiophene by *Rhodococcus* sp. strain IGTS8. *Applied and Environmental Microbiology* 59, 2837-2843.
- [25] Ania C.O., Bandosz T.J., (2006). Sodium on the surface of activated carbons as a factor enhancing reactive adsorption of dibenzothiophene, *Energy Fuel* 20, 1076–1080.
- [26] Yu G.X., Jin M., Sun J., Zhou X.L., Chen L.F., Wang J.A., (2013). Oxidative modifications of rice hull-based carbons for dibenzothiophene adsorptive removal, *Catalysis Today* 212, 31–37.
- [27] Deliyanni E., Seredych M., Bandosz T.J., (2009). Interactions of 4,6 dimethyldibenzothiophene with the surface of activated carbons, *Langmuir* 25, 9302–9312.
- [28] Ma X, Sprague M., Song C., (2005). Deep desulfurization of gasoline by selective adsorption over nickel-based adsorbent for fuel cell applications, *Industrial vs Engineering Chemistry Research*. 44, 5768–5775.
- [29] Cychosz K.A., Wong-Foy A.G., Matzger A.J., (2009). Enabling cleaner fuels: desulfurization by adsorption to microporous coordination polymers, *Journal of American Chemical Society* 131, 14538–14543.
- [30] Babich IV, Moulijn JA. (2003). Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review. *Fuel* 82, 607–31.
- [31] Akbari A., Omidkhan M., Darian J.T., (2014). Investigation of process variables and intensification effects of ultrasound applied in oxidative desulfurization of model diesel over

- MoO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. *Ultrasonics Sonochemistry* 21, 692–705.
- [32] Gao G.H., Cheng S.F., An Y., Si X.J., Fu X.L., Liu Y.M., Zhang H.J., Wu P., He M.Y., (2010). Oxidative desulfurization of aromatic sulfur compounds over titanosilicates, *ChemCatChem* 2, 459–466.
- [33] Abdalla Z.E.A., Li B.S., (2012). Preparation of MCM-41 supported (Bu<sub>4</sub>N)<sub>4</sub>H<sub>3</sub>(PW<sub>11</sub>O<sub>39</sub>) catalyst and its performance in oxidative desulfurization, *Chemical Engineering Journal* 200, 113–121.
- [34] Li Y., Zhao D., Lin J., Yuan G., (2009). Preliminary study on oxidative desulfurization of diesel via power ultrasound, *Energy Sources, Part A* 31, 191–198.
- [35] Abdalla Z.E.A., Li B., (2009). Tufail A. Preparation of phosphate promoted Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst and its application for oxidative desulfurization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15, 780–3.
- [36] Xu J.H., Zhao S., Chen W., Wang M., Song Y.F., (2012). Highly efficient extraction and oxidative desulfurization system using Na<sub>7</sub>H<sub>2</sub>LaW<sub>10</sub>O<sub>36</sub>·32H<sub>2</sub>O in [bmim] BF<sub>4</sub> at room temperature, *Chemistry-A European Journal* 18, 4775–4781.
- [37] Jianga W., Zhua W., Changa Y., Chaoa Y., Yina S., Liua H., Zhua F., Li H. (2014). Ionic liquid extraction and catalytic oxidative desulfurization of fuels using dialkylpiperidinium tetrachloroferrates catalysts. *Chemical Engineering Journal* 250, 48–54.
- [38] Sato T., Adschiri T., Arai K., Rempel G.L., F.T.T. Ng, (2003). Upgrading of Asphalt with or without Partial Oxidation in Supercritical Water *Fuel* 82, 1231–1239.
- [39] Kozhevnikov I.V., Nuzhdin A.L., Martyanov O.N., (2010). Transformation of petroleum asphaltene in supercritical water. *Journal of Supercritical Fluids* 55, 217–222.
- [40] Savage P.E., (1999). Organic Chemical reactions in supercritical water. *Chemical Reviews* 99, 603–621.
- [41] Siskin M., Katritzky A.R., (2010). Reactivity of organic compounds superheated water: general background. *Chemical Reviews* 101, 825–835.
- [42] Baiker A., (1999). Supercritical fluids in heterogeneous catalysis. *Chemical Reviews* 99, 453–473.
- [43] Ding Z.Y., Frisch M.A., Li L.X., Gloyna E.F., (1996). Catalytic oxidation in supercritical water. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 35, 3257–3279.
- [44] Katritzky A.R., Barcock R.A., Balasubramanian M., Greenhill J.V., Siskin M., Olmstead W.N., (1994). Aqueous high-temperature chemistry of carbo-and heterocycle. Reactions of sulfur-containing compounds in supercritical water at 4650°C. *Energy Fuels* 8, 498–506.
- [45] Adschiri T., Sato T., Shibuichi H., Fang Z., Okazaki S., Arai K., (2000). Extraction of Taiheiyo coal with supercritical water-HCOOH mixture. *Fuel* 79, 243–248.
- [46] Yuan P.Q., Cheng Z.M., Jiang W.L., Zhang R., Yuan W.K., (2005). Catalytic desulfurization of residual oil through partial oxidation in supercritical water. *Journal of Supercritical Fluids* 35, 70–75.
- [47] Elliott D.C., Sealock L.J., Baker E.G., (1993). Chemical processing in high-pressure aqueous environments. 2. Development of catalyst for gasification. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 32, 1542–1548.
- [48] Bontempelli F., Magno F. and Mazzocchin G.A., (1973). cyclic and A.C. voltamperometric study on dibenzothiophene in acetonitrile medium, *Electroanalytical Chemistry and interfacial Electrochemistry*, 43, 377- 385.
- [49] Seymour D.T, Verbeek A.G., Hrudey S.E., Fedorak F.M. (1997). Acute toxicity and aqueous solubility of some condensed thiophenes and their microbial metabolites. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16 (4), 658–665.
- [50] Hourani M. (1994). Desulfurization of thiophene by electrochemical perturbation. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 368, 139–42.
- [51] Comninellis, C. (1994). Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment. *Electrochimica Acta* 39, 1857-1862.
- [52] Vargas R., Núñez O. (2008). The photocatalytic oxidation of dibenzothiophene (DBT). *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 294,74–81.
- [53] Van Afferden M., Schacht S., Klein J., Trüper H.G., (1990). Degradation of dibenzothiophene by *Brevibacterium* sp. DO. *Archives of Microbiology* 153, 324–328.
- [54] Lia X., Cuib Y., Feng Y., Xiea Z., Gu J. (2005). Reaction pathways and mechanisms of the electrochemical degradation of phenol on different electrodes. *Water Research* 39, 1972–1981.
- [55] Feng C.P., Sugiura N., Shimada S., Maekawa T., (2003). Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system, *Journal of Hazardous Materials* 103, 65–78.
- [56] Tanaka F., Feng C.P., Sugiura N., Maekawa T., (2003). Electrochemical removal of ammonium ion and organic substances from landfill leachate, *Japanese Journal of Water Treatment Biology* 39, 75–84.

- [57] Li M., Feng C., Hu W., Zhang Z., Sugiura N., (2009). Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO<sub>2</sub>-Pt and Ti/IrO<sub>2</sub>-Pt. *Journal of Hazardous Materials* 162 (2009) 455–462.
- [58] Bhatia S., Sharma D.K. (2010). Biodesulfurization of dibenzothiophene, its alkylated derivatives and crude oil by a newly isolated strain *Pantoea agglomerans* D23W3. *Biochemical Engineering Journal* 50, 104–109.
- [59] Del Olmo C.H, Alcon A., Santos V.E., García-Ochoa F. (2005). Modeling the production of a *Rhodococcus erythropolis* IGTS8 biocatalyst for DBT biodesulfurization: Influence of media composition. *Enzyme and Microbial Technology* 37, 157-166.
- [60] Alves L, Salgueiro R, Rodrigues C, Mesquita E, Matos J, Gúrio FM (2005). Desulfurization of dibenzothiophene, benzothiophene and other thiophene analogues by a newly isolated bacterium, *Gordonia alkanivorans* strain 1B. *Applied Biochemistry Biotechnology* 120, 199–208.
- [61] Tao X., Zhou Y., Wei Q., Yu G., Cui Q., Liu J., Liu T. (2014). Effect of morphology properties of NiW catalysts on hydrodesulfurization for individual sulfur compounds in fluid catalytic cracking diesel. *Fuel Processing Technology* 118, 200–207.
- [62] Liu H., Yin C., Li H., Liu B., Li X., Chai Y., Li Y., Liu C. (2014) Synthesis, characterization and hydrodesulfurization properties of nickel–copper–molybdenum catalysts for the production of ultra-low sulfur diesel. *Fuel* 129, 138–146.
- [63] Lewandowski M. (2014). Hydrotreating activity of bulk NiB alloy in model reaction of hydrodesulfurization 4,6-dimethyldibenzothiophene. *Applied Catalysis B: Environmental* 160–161, 10–21.
- [64] Song H., Gao J., Chen X., He J., Li C., (2013). Catalytic oxidation-extractive desulfurization for model oil using inorganic oxysalts as oxidant and Lewis acid-organic acid mixture as catalyst and extractant. *Applied Catalysis A: General* 456, 67– 74.
- [65] Long Z., Yang C., Zeng G., Peng L., Dai C., He H. (2014). Catalytic oxidative desulfurization of dibenzothiophene using catalyst of tungsten supported on resin D152. *Fuel* 130, 19–24.
- [66] Al-Shahrani, Xiao T., Llewellyn S.A., Barri S., Jiang Z., Shi H., Martinie G., Green M.L.H., (2007). Desulfurization of diesel via the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation of aromatic sulfides to sulfones using a tungstate catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental* 73, 311–316.
- [67] Silva G., Voth S., Szymanski P., Prokopchuk E.M., (2011). Oxidation of dibenzothiophene by hydrogen peroxide in the presence of bis(acetylacetonato)oxovanadium(IV). *Fuel Processing Technology* 92, 1656–1661.
- [68] Lam V., Li G., Song C., Chen J., Fairbridge C., Hui R., Zhang J. (2012). A review of electrochemical desulfurization technologies for fossil fuels. *Fuel Processing Technology* 98, 30–38.
- [69] Ovalles C., Rojas I., Acevedo S., Escobar G., Jorge G., Gutierrez L.B., Rincon A., Scharifker B., (1996). Upgrading of Orinoco Belt crude oil and its fractions by an electrochemical system in the presence of protonating agents, *Fuel Processing Technology* 48, 159–172.



# Comunícate con tu Facultad

**Departamento de Difusión y Comunicación  
de la Facultad de Ingeniería**

Edificio Multiaulas "Luis Barragán"  
Cubículo Dos  
Ciudad Universitaria



**comunicate.fi@gmail.com**

## ACREDITACIONES

Nuestro programa de la Licenciatura en Ingeniería Civil cuenta con reconocimiento vigente del Consejo para la Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), organismo reconocido por COPAES para la evaluación de programas de Ingeniería.

**CACEI**

EL CONSEJO DE ACREDITACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA A.C.  
RECONOCIDO POR EL CONSEJO PARA LA ACREDITACIÓN DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, A.C.

**ACREDITA**

AL PROGRAMA DE

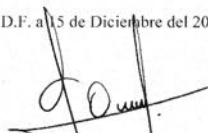
**INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA**

**DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

DEL DÍA 15 DE DICIEMBRE DEL 2011 AL 14 DE DICIEMBRE DEL 2016  
POR CUMPLIR CON LOS REQUISITOS DE CALIDAD EDUCATIVA  
ESTABLECIDOS POR EL CACEI.

México, D.F. a 15 de Diciembre del 2011



Ing. Fernando Ocampo Capabal  
Presidente del Consejo Directivo

ACTA No. 1178





# Caracterización de inundaciones y vulnerabilidad de la población con casos de estudio en México

Oscar Sánchez Flores, Edgar Iram Villagrán Arroyo,  
Ana Elena Posada Sánchez, Carlos Díaz Delgado

## RESUMEN

Los riesgos de precipitaciones extremas e inundaciones podrían incrementarse en frecuencia e intensidad. Con la finalidad de aportar elementos para la identificación y aminorar sus impactos sociales, se propone un marco de referencia en el que se aportan cinco elementos: a) la revisión del concepto de inundación desde la perspectiva social, b) el análisis de esta definición en términos del contexto de aplicación, c) un marco que identifica los elementos de la definición como alternativa para su estandarización, d) el énfasis sobre los daños a la sociedad a través del concepto de vulnerabilidad y percepción del riesgo. Finalmente, e) la introducción de los estados de riesgo como elemento indicativo de la vulnerabilidad. Este marco de referencia se aplica a tres estudios de caso que resultan de la caracterización del estado de riesgo en poblaciones mexicanas a partir del cual se muestra la factibilidad de implementarlo en un ámbito más amplio.

**Palabra clave:** inundación, vulnerabilidad, riesgo, daños, preparación.

## ABSTRACT

The risks of extreme rainfall and flooding could increase in frequency and intensity. With In order to provide elements for identification and mitigate its social impacts, a framework is proposed reference in which five elements are provided: a) the review of the concept of flooding from the perspective social, b) analysis of this definition in terms of application context, c) identifying the frame defining elements for alternatively standardization d) emphasis on the damage to society through the concept of vulnerability and perception of risk. Finally, e) introducing states risk as indicative element of vulnerability. This framework is applied to three case studies resulting from the characterization of risk status mexican populations from which shown the feasibility of implementing it in a broader context.

**Keyword:** Flooding, vulnerability, risk, damage, preparation.

---

Recibido 9 de junio, 2014; aceptado 29 de agosto, 2014

Oscar SÁNCHEZ FLORES  
Correo electrónico: oscar.sanchezflores@correo.buap.mx  
Edgar Iram VILLAGRÁN ARROYO  
Ana Elena POSADA SÁNCHEZ  
Facultad de Ingeniería. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Avenida San Claudio SN. Cd Universitaria. 69121 Puebla, Puebla

Carlos DÍAZ DELGADO  
Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.5, Unidad San Cayetano, C.P. 50200 Toluca, Estado de México, México.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los desastres de origen hidro-meteorológico son los que causan más daño en el mundo [1, 2], entre todos los desastres reportados entre 1996 y 2008. Las inundaciones han representado poco más del 50% de la gente afectada. Han ocasionado el 30% de las pérdidas económicas de la totalidad de los desastres ocurridos. Asimismo se ha registrado que, en promedio cada año, las inundaciones ocasionan más de 9,000 muertes y afectan a 115 millones de personas provocando daños económicos equivalentes a 19 bi-

llones de dólares americanos. En México, las inundaciones han provocado pérdidas económicas y un gran número de damnificados: entre 1950 y 1988 se registraron 2,681 inundaciones en todo el país, afectando a más de 17.7 millones de habitantes [3]. En [4] y [5] se muestra que el riesgo de precipitaciones extremas e inundaciones podría incrementarse en el futuro debido al aumento de los niveles de dióxido de carbono atmosférico. En este contexto, se espera que los efectos de las lluvias intensas resulten en inundaciones urbanas y desbordamientos de cauces más frecuentes en zonas inundables. Las inundaciones serán cada vez más amplias, devastadoras y costosas para la sociedad. Los derrumbes, avalanchas e inundaciones dañan las infraestructuras (red carretera, puentes, inmuebles), impactan la agricultura, (debido a la pérdida de nutrientes y la erosión del suelo además de la pérdida de cosechas), afectan el estado emocional de las personas y en general la productividad de la zona o región afectada. Este pronóstico global presenta cuatro tendencias a las que no está exento el caso mexicano:

*Las inundaciones son los fenómenos hidrometeorológicos de mayor impacto para la sociedad*, por sus características en cuanto a la dimensión espacial y temporal [6]. Los desastres debidos a inundaciones suponen aproximadamente un tercio de todas las catástrofes naturales que se producen alrededor del mundo, al menos en cuanto a pérdidas económicas, y además son la causa de al menos más de la mitad de las víctimas fatales [7].

*Las precipitaciones son más intensas y numerosas*. En el caso de México, en la costa Atlántica se tiene un promedio anual de ocho huracanes, de los cuales, al menos dos entran a tierra firme; en tanto que por el Océano Pacífico el promedio anual se eleva a 13, de los cuales cuatro entran a tierra firme, causando graves daños [8]. Por otro lado, las lluvias intensas y las consecuentes inundaciones y deslaves se presentan también de forma independiente a la temporada de ciclones siendo resultado de las tormentas generadas en la época de lluvias. El número de tormentas en el país presentan incremento de intensidad en el periodo 1996-2007 mientras que en 2008 se tuvo el registro más elevado del periodo.

*Los daños generados por las inundaciones son cuantiosos*. En México, como ejemplo, se pueden citar las inundaciones provocadas por la depresión tropical que cubrió el litoral centro y sur del Golfo de México y el Istmo de Tehuantepec, en octubre de 1999, la cuál ha sido considerada como la depresión

tropical más devastadora de los últimos 40 años. En el caso de Puebla los daños fueron cuantiosos –más de 2,300 millones de pesos– y afectaron una amplia zona del estado. El fenómeno generó la pérdida de 263 vidas humanas y los daños se extendieron a 81 municipios. [8]. Otro episodio de precipitación extraordinaria ocurrió en el año 2007 en el Estado de Tabasco, en la cuenca media del Rio Grijalva, que inundó alrededor del 70% del territorio del Estado con tirantes del agua en algunos sitios del orden de los cuatro metros. Cerca de un millón de personas fueron afectadas, aparte de los daños materiales ocurridos y las horas-hombre perdidas [9]. Por su parte, el Estado de México y Veracruz son las entidades federativas con mayor índice histórico de inundaciones ya que en el periodo 1970 a 2003 han sufrido más de 200 eventos de este tipo [10].

Existe un interés gubernamental y social creciente pero técnicamente insuficiente por mitigar los efectos negativos de las inundaciones. Los tomadores de decisiones están llevando a cabo acciones para reducir el impacto de estos eventos. De hecho, muchas de ellas se han implementado con éxito en diversos países propensos a estos desastres [6]. En México, se trabaja en el desarrollo de los Planes de Emergencia, los Sistemas de Alerta Hidrometeorológica y los Centros Regionales para Atención de Emergencias para la disminución de los riesgos por inundaciones. En años recientes se han implementado sistemas para la medición, control y alerta ante estos fenómenos (fase de preparación) [11], pero muy poco se ha enfocado a la necesidad de mecanismos de respuesta ante los desastres que permitan salvaguardar el mayor número de vidas posibles (fase de respuesta). El mayor sistema de respuesta que se tiene en México es el plan DN-III del ejército mexicano [13] donde se despliegan efectivos para colaborar en las acciones de rescate y evacuación.

Con la finalidad de aportar elementos para la toma de decisiones documentadas y oportunas que aminoren los impactos de las inundaciones a la sociedad, en este artículo, se desarrolla y aplica (en tres ciudades mexicanas) un marco de referencia. Dicho marco permitiría estandarizar el conocimiento al respecto y en particular entender los estados de riesgo o vulnerabilidad en los que se encuentra la población.

Los resultados empíricos son de importancia para definir una política de prevención, preparación, mitigación, reacción, recuperación y protección de las zonas y agentes económicos vulnerables a los diversos tipos de inundaciones.

El marco de referencia que se propone se compone de cinco elementos: a) la revisión del concepto de inundación desde la perspectiva social, b) el análisis de esta definición en términos del contexto de aplicación, c) un marco que identifica los elementos de la definición como alternativa para su estandarización, d) el énfasis sobre los daños a la sociedad a través del concepto de vulnerabilidad y percepción del riesgo. Finalmente, e) la introducción de los estados de riesgo como elemento indicativo de la vulnerabilidad.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación empírica presentada toma como punto de partida la revisión del estado del arte de las inundaciones orientada a la percepción y vulnerabilidad social. Esta revisión se emplea como base para construir un instrumento de colecta de información en campo cuyos resultados se describen en la Sección 3. El cuestionario obtenido es el resultado del análisis en grupos focales y de encuestas piloto aplicadas en cada uno de los sitios seleccionados [12]. Fue aplicado mediante entrevista directa con el jefe de familia de cada hogar seleccionado de forma aleatoria. Se obtuvo una muestra de 50 encuestas para Anganguero y Santiaguíto y 125 para Villahermosa. Las entrevistas se realizaron durante el mes de agosto de 2010 en el área afectada por cada una de las inundaciones.

### 2.1. Conceptos y tipologías

En la literatura se establecen numerosas definiciones y clasificaciones del concepto inundación lo que denota una falta de consenso al respecto. Más allá de esta diversidad, desde un punto de vista de vulnerabilidad social, se requiere garantizar que la población en general entiende un solo concepto. Bajo esta lógica se realiza una revisión bibliográfica de las definiciones existentes para articular la noción social de inundación. La revisión incluye tres aportaciones: identificación de elementos que se incluyen en su definición, tipos de definiciones en función del contexto de aplicación y finalmente, una tipología para su clasificación.

#### *Elementos para la definición*

Se identifican tres elementos que generalmente se incluyen en la definición de inundación:

*Verbo con complemento circunstancial de modo o gerundio* que es el que establece el ¿qué? a través de la acción de alguno de los verbos: acumular, anegar, cubrir, desbordar, derramar, hundir.

*Referencia espacial.* Establece el ¿dónde? y en ocasiones el ¿por qué? del fenómeno. Puede aparecer de forma indistinta indicando el origen de la inundación.

*Impacto.* Complementa los dos elementos anteriores al describir el tipo de daño que el fenómeno puede ocasionar.

El primero de estos elementos se puede tratar como sinónimo aunque explícitamente sus autores no lo consideren así. Para los fines de este artículo, se ha preferido diferenciar las definiciones a través de los elementos referencia espacial e impacto. En términos espaciales, se identifican dos grupos. Por un lado, el que considera que la inundación puede referirse a un estado atípico de los cauces naturales (arroyos, ríos, etc.). Por otro lado, el que se relaciona con la presencia de agua en superficies llanas que normalmente están “secas” sin considerar el eventual origen. En este sentido, este segundo grupo es más amplio y general. En cualquiera de los casos, la referencia espacial se asocia a los cauces del agua sean estos naturales o artificiales sin excluir necesariamente otras superficies y que el origen puede ser natural (caso de fenómenos naturales) o inducido (desfogue de presas, descontrol de cauces artificiales). En cuanto al elemento que describe el impacto, su consideración establece dos grupos: los que lo refieren implícita o explícitamente y los que no lo hacen. En la Sección 3, se describe el tipo de efectos generados por una inundación.

#### *Definición y contexto de aplicación*

Tomando en cuenta que las definiciones previas se modifican en función del contexto de aplicación, es conveniente distinguir el concepto de inundación de tres maneras:

*Teórica o conceptual:* cuando está orientada a establecer lineamientos u orientaciones de carácter general o el significado en los términos de las teorías de una determinada disciplina.

*Funcional/operacional:* cuando la definición tiene una utilidad específica y su empleo tiene un fin determinado. Generalmente tiene criterios de cuantificación.

*Ostensiva.* Cuando para la definición se señalan descripciones, ejemplos o referencias.

La literatura hispana de las inundaciones contiene principalmente definiciones de los primeros dos tipos [12]. Sin embargo, sus tecnicismos pudieran representar cierta dificultad para el entendimiento de la población en general al momento de comunicar este concepto. En el caso de estudios en campo, como los realizados en este trabajo, lo recomendable es elaborar y utilizar definiciones ostensivas.

### *Tipología de inundaciones*

Un tercer elemento para establecer el marco de referencia consiste en construir una tipología de definiciones. Para ello se identifican primeramente las dimensiones o criterios que se incluyen normalmente en su definición y posteriormente se determina cuántas de estas dimensiones son consideradas en ella. Bajo esta consideración, se identificaron cinco criterios o dimensiones:

*Causal:* cuando se incluye el origen de la inundación.

*Espacial:* cuando se hace referencia a un espacio geográfico para identificar el origen, extensión o zona afectada.

*Temporal:* cuando se consideran elementos de duración y tiempo.

*Magnitud:* cuando se incluyen criterios que permiten cuantificar la importancia de la inundación.

*Impacto:* cuando se considera el daño ocasionado.

En este sentido, la revisión de la literatura muestra que la mayoría de las definiciones son unidimensionales y muy pocas bidimensionales. Por ello, con fines de estandarización se recomienda utilizar aquellas que sean multidimensionales. En [12] se aplica la tipología propuesta para clasificar un conjunto de definiciones.

### *2.2. Daños por inundación*

Un cuarto elemento del marco de referencia se refiere al daño ocasionado y la vulnerabilidad de la población a las inundaciones.

Toda clase de perjuicio causado por una inundación abarca un amplio rango de efectos nocivos no solo en los humanos, su salud y sus pertenencias sino también en la infraestructura pública, herencia cultural, sistemas ecológicos, producción industrial y fuerza competitiva en la economía afectada [14]. Los daños causados por inundación son normalmente categorizados en daños directos e indirectos pudiendo ser tangibles e intangibles [15].

*Daños directos:* todo tipo de perjuicio que se relaciona con el contacto físico inmediato del agua de inundación con las personas, propiedades y el medio ambiente. Incluye daño a edificios, bienes económicos, diques, pérdida de cultivos y ganado, pérdidas humanas, impactos inmediatos a la salud, contaminación de sistemas ecológicos.

*Daños indirectos:* ocurren como consecuencia de la inundación y la interrupción de actividades económicas y sociales. Pérdida de producción económica debido a instalaciones destruidas, falta de suministro

de energía y telecomunicaciones, interrupción de suministro de bienes. Pérdida de tiempo y beneficios debido a la interrupción en el tránsito vehicular. Perturbaciones en los mercados (aumento de precios de alimentos).

*Daños tangibles:* daños que pueden ser fácilmente especificados en términos monetarios. Daños a bienes, pérdida en la producción [15]. Incluye daño físico a propiedades y bienes, e impactos a la salud debido a la inundación. Estos costos pueden ser estimados utilizando datos de mercado [16].

*Daños intangibles:* toda clase de bienes y servicios en los que no existe un mercado para realizar transacciones [16], por lo que resulta más complicado valorarlos en términos monetarios como son fallecimientos, efectos a la salud, daños a bienes ecológicos [15]. Se incluyen en esta categoría impactos a la salud relacionados con estrés, pérdida o daño de bienes irremplazables. Se manifiestan como la pérdida de utilidad debido a restricción de actividades, dolor y sufrimiento, ansiedad sobre el futuro y preocupación.

### *2.3. Vulnerabilidad y riesgo*

Se considera que los daños ocasionados por las inundaciones están asociados a la vulnerabilidad y la percepción del riesgo de las personas. Para sostener este planteamiento, primeramente se identifican las características de la percepción del riesgo para posteriormente establecer los estados en las que se puede encontrar un individuo o una población determinada considerando su experiencia previa.

#### *Percepción riesgo*

La percepción de riesgo está caracterizada como un juicio intuitivo de individuos sobre el riesgo en un contexto de información limitada e incierta [17], [18]. Es el conocimiento o creencia de la seriedad de la amenaza de un evento extremo del medio ambiente, así como la probabilidad subjetiva de experimentar daños [19]. Se identifican tres características del riesgo aplicables a inundaciones [18]:

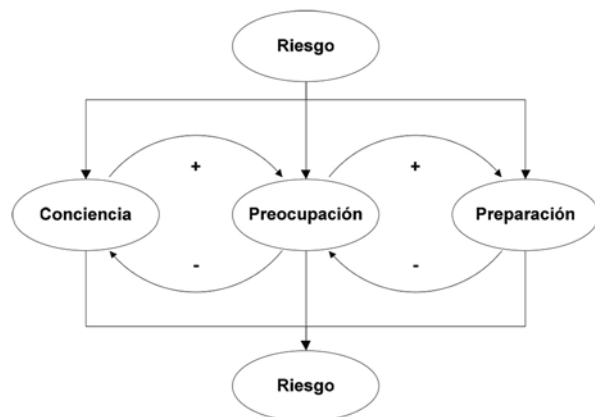
*Preocupación:* Es el temor o miedo experimentado por el peligro que representa una inundación.

*Conciencia:* Conocimiento del riesgo al que se encuentra expuesto una persona.

*Preparación:* Control sobre el riesgo.

La percepción de riesgo resulta de la relación entre estas tres características. El modelo conceptual de la figura 1 indica que un mayor nivel de conciencia conlleva un nivel de preocupación mayor, lo que trae como consecuencia un mayor nivel de preparación. En sentido inverso, una sociedad más preparada se

encontrará menos preocupada acerca del riesgo a la que está expuesta. Sin embargo, en el largo plazo, cuando se tiene consciencia de un nivel de preparación elevado, el nivel de preocupación se reduce lo que conllevará un nivel de conciencia menor ante la exposición al riesgo lo que nuevamente eleva la posibilidad que una población pueda sufrir algún tipo de daño aumentando su vulnerabilidad



**Figura 1.** Característica de la percepción del riesgo. Adaptado de [18].

#### *Estados del riesgo y vulnerabilidad*

Los estados de riesgo que se describen a continuación son un indicativo del nivel de vulnerabilidad de una población. Pueden conocerse a priori con la información cualitativa histórica relativa a: a) la frecuencia de ocurrencia, la altura, duración y velocidad, y b) el nivel de preparación, preocupación y conciencia de la población.

*Ignorancia:* En este estado, la población no está preocupada ni preparada para hacer frente a un episodio de emergencia principalmente porque no tiene consciencia del riesgo lo que a su vez está asociado a una falta de información. Es representativo de una población que no ha experimentado previamente una inundación o ésta tiene una frecuencia de aparición muy baja. Representa la situación de exposición a daños o vulnerabilidad más elevada.

*Demanda de reducción de riesgo:* Corresponde a un estado en el que las personas están altamente conscientes y preocupadas por el riesgo a que están sujetos pero carecen de una preparación para hacer frente a la emergencia. Este estado es común en poblaciones con antecedentes de inundaciones recurrentes y de magnitud elevada que no cuentan con sistemas adecuados de información, prevención, evacuación, albergues y cadenas de abastecimiento o

aprovisionamiento. En este estado el nivel de vulnerabilidad es alto.

*Sensación de control:* Es un estado similar al previo sólo que la población cuenta con una preparación adecuada y sistemas de apoyo eficientes por lo que su nivel de preocupación es baja. Se presenta principalmente en poblaciones que han sufrido de manera recurrente inundaciones de magnitud importante cuyos daños han sido aminorados por el grado de preparación e intervención.

*Sensación de seguridad:* Este estado predomina cuando la población tiene un elevado nivel de conciencia del riesgo al que está expuesto y considera que está preparada (sin que sea el nivel de preparación más adecuado) para hacer frente a una posible emergencia por lo que su nivel de preocupación es bajo. Es típico en poblaciones en las que se presentan inundaciones recurrentes de baja magnitud y los daños no han sido muy importantes.

Cabe mencionar que el efecto de crisis por una emergencia indica que la conciencia de desastre aumenta durante e inmediatamente después de que ocurre, pero se disipa rápidamente [20]. Es decir, existe la tendencia a la amnesia social. Se piensa, de forma optimista, que no volverá a suceder [21].

Los estados de riesgo están asociados a una serie de factores que permiten la transición entre ellos y en su caso inciden en que sean reforzados o transformados. Por ejemplo, una persona que tenga la propiedad de una casa se encontrará más preocupada, debido al miedo de perderla [22]. Una persona adoptará medidas de protección dependiendo de sus características socioeconómicas y de varios factores como son la participación en actividades de defensa civil, la cercanía de la vivienda a un cuerpo de agua [23], [24] o el suministro de información respecto a medidas de prevención ante un evento de inundación [25]. Las medidas de protección también se dan por parte del gobierno. Conforme éste brinde mayor confianza a la población, la preocupación de la gente será menor [26]. En [12] se establece la relación entre los factores que inciden sobre el estado de riesgo en caso que se pretenda articular un conjunto de acciones o una política pública para modificar estos estados de riesgo.

### 3 RESULTADOS

En la tabla 2, se sintetizan las características de tres casos de estudio seleccionados para validar el marco de referencia propuesto: Villahermosa, considerada

**Tabla 2.** Elementos que generalmente se incluyen en la definición de inundación.

Lugar de aplicación	Villahermosa, Tabasco	Santiaguito C, Estado México	Angangueo, Michoacán
Frecuencia	Recurrente	Recurrente	No recurrente
Altura	Alta	Baja	Media
Duración	Alta	Baja	Baja
Velocidad	Media	Baja	Alta
Preparación	Baja	Alta	Baja
Preocupación	Alta	Baja	Baja
Conciencia	Alta	Alta	Baja
Estado de riesgo	Demanda de reducción del riesgo	Sensación de seguridad	Ignorancia
Tirante máximo en la inundación más severa (m)	4 [9]	1.5 [27]	1.5[28]
Año de la inundación más severa	2007	2007	2010

**Fuente:** Elaboración propia

una población en estado de demanda de reducción del riesgo. En este lugar ocurren inundaciones recurrentes. De altura y duración elevada. Los habitantes tienen conciencia y preocupación alta aunque no necesariamente se encuentran totalmente preparados. Santiaguito Coaxustenco, es una localidad semiurbana en la que las inundaciones, por el desbordamiento del arroyo local, son frecuentes. Sin embargo, su altura, duración y velocidad son bajas. La población se encuentra en un estado de sensación de seguridad. Finalmente Angangueo, tiene una población en estado de ignorancia ya que tiene una preparación, preocupación y conciencia bajas debido a que las inundaciones son raras. Lo anterior se pudo constatar en la inundación de 2010 la cual debido a la alta velocidad y al arrastre de materiales causó daños importantes.

#### *Contexto y estado de riesgo*

La vivienda típica de la muestra corresponde a una construcción de entre uno y dos niveles con cuatro piezas en la que viven 4.3 personas en promedio. Santiaguito y Angangueo presentan un perfil típico de localidad semiurbana en términos del número de piezas y habitantes por hogar a diferencia de Villahermosa que tiene un perfil más urbano.

El concepto social de inundación, en los tres casos, corresponde a una definición ostensiva referida principalmente al hecho que el agua entre a la vivienda (65.9%) y los daños tangibles directos ocasionados (14.8%).

El conocimiento de que la vivienda se encuentra en una zona de riesgo es un elemento determinante

de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno y del conocimiento del estado de riesgo. En este sentido, se puede corroborar que en Villahermosa la frecuencia de ocurrencia es alta ya que tres de cuatro personas indica saber que su vivienda se ubica en una zona de riesgo. En Santiaguito, la frecuencia es media con la mitad de los encuestados que sabe que se localiza en una zona de riesgo. Finalmente, Angangueo claramente se encuentra en una situación de ignorancia ya que solo el 2% de los hogares encuestados indicaron saber que habitan en una zona de riesgo.

En términos generales, se puede constatar que la población no está informada sobre qué hacer en caso de una inundación. A juzgar por el medio informativo fuente solo el 60% lo sabría para los tres sitios siendo el caso de menor información el de Angangueo con tan solo una de cuatro personas. El medio de mayor penetración para tal fin es la televisión (30%), el periódico (11%) y las juntas vecinales (3%).

En cuanto a las características de la inundación más severa en términos de altura, velocidad y duración, se puede diferenciar claramente que las de mayor altura ocurren en Villahermosa ya que el 95% de los encuestados declara que ha rebasado la altura del refrigerador teniendo un máximo de 4 metros. En el caso de Santiaguito, las alturas típicas pueden llegar hasta la base de la mesa (70% de los casos) en tanto que en Angangueo alcanzó en la mayoría de los hogares encuestados la base de la mesa (90% de los casos). Es de notar que en este caso la mayoría de los encuestados entendió claramente las referencias ostensivas de la altura de la inundación. En términos

de velocidad, planteada como el tiempo que transcurre para alcanzar la altura máxima de inundación, la inundación de Anganguero fue la más rápida ya que el 66% de los encuestados indica que la altura máxima se alcanzó en minutos, en tanto que en Villahermosa, la velocidad de inundación es menor, ya que tomó de minutos (50%) a horas (39.2%) y en Santiaguito la inundación típica tarda horas en llegar a su altura máxima (52%). En relación a la duración, los eventos más prolongados son los de Villahermosa ya que toman de semanas (54.2%) a meses (23.3%), lo sigue Santiaguito que duran de minutos (22%) a horas (52%) y finalmente Anganguero con tiempos que van de minutos (65.9%) a horas (22.7%).

#### *Daños por inundación*

Los daños tangibles directos fueron más importantes en Villahermosa. En más de tres de cuatro viviendas declararon que sufrieron afectaciones a los muebles, electrodomésticos y automóvil sufriendo en más de la mitad de los casos la pérdida total. Anganguero, registra afectaciones con pérdida total a muebles, electrodomésticos y automóviles en cerca de un tercio de los encuestados. Finalmente, en Santiaguito este tipo de daño es menos importante ya que alrededor de una de cada cinco personas son afectadas. En cuanto a los daños tangibles indirectos, la población más afectada fue Anganguero ya que el porcentaje de personas que indica haber sufrido este tipo de daño es el más alto para los tres casos estudiados resaltando de entre ellos la inhabilitación de su lugar de trabajo y las calles bloqueadas. En segundo lugar, se encuentra Villahermosa y en mucho menor medida Santiaguito en donde las afectaciones tienen que ver con las calles bloqueadas a la circulación y la imposibilidad de salir del domicilio. Los daños intangibles indirectos medidos a partir de síntomas fisiológicos ante el estrés son poco percibidos por los encuestados. En Santiaguito y Villahermosa 65.6% y 81.8% de los encuestados declararon no haber sufrido ningún síntoma fisiológico como consecuencia de la inundación contrariamente a Anganguero en el que 72% experimentaron alguno de ellos. Es posible que el efecto de inmediatez, la frecuencia de ocurrencia y los impactos generados jueguen un papel relevante en las respuestas obtenidas considerando que en Anganguero la inundación no es recurrente y las encuestas se aplicaron pocas semanas después de haber ocurrido por lo que las personas habían vivido recientemente las consecuencias del evento. Los síntomas fisiológicos y su relación con los daños ocasionados por ansiedad son

tratados, caracterizados y evaluados de forma más detallada en [12].

#### *Percepción del riesgo*

Respecto a la percepción de riesgo ante inundaciones futuras, la población de Anganguero se encuentra en un riesgo muy alto debido a la poca conciencia y propensión a prepararse para un evento posterior. En efecto, más de tres de cada cuatro entrevistados considera que es nada o poco probable que vuelvan a vivir un episodio de inundación y por lo tanto no sufran daños en su hogar o pertenencias (84%). Lo opuesto sucede en Villahermosa, ya que más de la mitad de los encuestados indica que es moderadamente y muy probable que ocurra otra inundación y que en consecuencia sufran daños en su hogar (75%), a sus pertenencias (70%) o incluso puedan tener familiares heridos (74%). Por su parte, Santiaguito se encuentra en una situación parecida a Anganguero, aunque con menor intensidad, ya que en esta localidad la mitad de la población considera que es poco o nada probable que sufra una inundación con un nivel similar en cuanto a la probabilidad de los daños. Estos resultados son consistentes con las medidas individuales que la población toma en forma individual para protegerse de futuras inundaciones. En Villahermosa y Santiaguito más del 75% de los encuestados declara que no tomará ninguna medida un porcentaje muy superior a Anganguero (45.8%) cuyos encuestados indican que utilizarán costales para prevenirse (41.7%).

## **4 DISCUSIÓN**

Las tendencias relativas a la frecuencia e intensidad de las inundaciones han generado una preocupación social y gubernamental respecto a desarrollar mecanismos y sistemas de prevención, preparación, mitigación, reacción, recuperación y protección de las zonas y agentes económicos vulnerables. Estos sistemas deben ser concebidos, diseñados e implementados acorde a las necesidades y expectativas de la población. Esta condicionante plantea un desafío mayor que consiste en resolver un problema multidimensional a través de la especialización técnica, lo que conlleva a realizar un trabajo multidisciplinario en la que generalmente la ausencia de un marco teórico o de referencia común está ausente. En este artículo se desarrollan, a partir de la revisión de la literatura y de un estudio empírico en la población afectada. La información colectada con el instrumento de campo en las direcciones referidas puede ser utilizada no

solo para orientar políticas públicas de prevención y reacción eficientes en favor de los agentes económicos vulnerables sino también como insumos para desarrollar las herramientas de modelación que permitan evaluar diferentes alternativas para el diseño de sistemas de prevención y reacción ante eventos extremos. Algunas de ellas necesarias como desarrollos futuros son: localización de albergues y centros de distribución, diseño y coordinación de la cadena de abastecimiento, diseño y operación de las rutas de evacuación, análisis de los procesos de decisión de las población en riesgo o potencialmente afectada.

## REFERENCIAS

- [1] CRED-CRUNCH Annual Disaster Statistical Review 2007: Numbers and Trends. Centre for Research on the Epidemiology of Disaster., Université Catholique de Louvaine, Belgique (2008).
- [2] CRED-CRUNCH Annual Disaster Statistical Review 2008: The numbers and trends. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Université Catholique de Louvaine, Belgique. (2009).
- [3] Aragón-Durand, Fernando Estrategias de protección civil y gestión de riesgo hidrometeorológico ante el cambio climático. Instituto Nacional de Ecología, Coordinación del Programa de Cambio Climático, México (2008).
- [4] Palmer, T. y J. Räisänen Quantifying the Risk Of Extreme Seasonal Precipitation Events In A Changing Climate. *Nature*, 415, Nature Publishing Group, New York, pp. 512 – 514. (2002).
- [5] Milly, P., Wetherald, R, Dunne, K. y T. Delworth Increasing Risk Of Great Floods In A Changing Climate, *Nature*, 415, Nature Publishing Group, New York, pp. 514–517 (2002).
- [6] Lopardo, R- y R. Seoane Algunas reflexiones sobre crecidas en inundaciones, *Fundación para el fomento de la Ingeniería del Agua*, 7 (1), Universidad politécnica de Catalunya, Catalunya, pp. 11-22. (2000).
- [7] CRED Base de datos EMDAT, <http://www.emdat.be>, 29 de Noviembre de 2010. (2002).
- [8] Bitrán, D. , “Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980 – 1999”, CENAPRED, México (2001).
- [9] Ramírez, Aldo, “Inundaciones en Tabasco, México 2007”, Seminario Internacional sobre desastres por inundación, Querétaro, México, (2009).
- [10] CENAPRED. <http://www.cenapred.unam.mx/>, (2014).
- [11] Kovács, G., y Spens, K. M.. Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(2), 99–114 (2007).
- [12] Sánchez, O. Díaz D. Gaytán, J., Astudillo O. y Castañeda, R y Rodríguez, O. Diagnóstico del impacto social generado por inundaciones en México. Tres casos de estudio. En pp. Universidad Autónoma de Querétaro. (2012).
- [13] SEDENA, Plan DN-III-E, <http://www.sedena.gob.mx/index.php/actividades/plan-dn-iii-e>, 29 de noviembre de 2010 (2010).
- [14] Messner, F. y V. Meyer Flood damage, vulnerability and risk perception - challenges for flood damage research, *UFZ Discussion Papers* 13/2005 (2005).
- [15] Messner, F., E. Pennyng-Rowell, C. Green, V. Meyer, S. Tunstall y A. van der Veen (2007) Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. *Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies*, Floodsite T09-06-01. (2007).
- [16] RPA/FHRC The Appraisal of Human Related Intangible Impacts of Flooding, Risk & Policy Analysts Ltd y Flood Hazard Research Centre. Technical Report FD2005/TR, London (2004).
- [17] Slovic, Paul The perception of risk, 1st edn., Earthscan publications Ltd., Londres (2000).
- [18] Raaijmakers, R., J. Krywkow y A. van der Veen Flood risk perceptions and spatial multi-criteria analysis: an exploratory research for hazard mitigation, *Natural Hazards*, 46, Springer, Twente, pp.307–322 (2008).
- [19] Olczyk, M. Flood risk perception in the red river Basin, Manitoba: Implications for hazard and disaster management *Natural Resources Institute*, University of Manitoba (2004).
- [20] Shen, X. Flood risk perception and communication within risk management in different cultural contexts *Institute for Environment and Human security*, Vol 1, Bonn, Alemania. (2010).
- [21] Vallejo, A. y J. Vélez La percepción del riesgo en los proceso de urbanización del territorio, *Entorno geográfico* 1. 70-78 (2002).
- [22] Motoyoshi, T., T. Sato, T. Fukuzondo, K. Seo y S. Ikeda Factors determining residents preparedness for floods in modern megalopolises: the case of the Tokai flood disaster in Japan, *Journal of Risk Research*, 7, 7, Taylor & Francis Group, Tsukuba, pp. 775 – 787 (2004).
- [23] Miceli, R., I. Sotgiu y M. Settanni Disaster preparedness and perception of flood risk: A study in an alpine valley in Italy, *Journal of Environmental Psychology*, 28, 2, Elsevier LTD, Amsterdam, pp. 164–173 (2007).



- [24] Saurí, D., A.Ribas, A. Lara y D. Pavón La percepción del riesgo de inundación: experiencias de aprendizaje en la Costa Brava, Papeles de Geografía 2010, 51-52; pp. 269-278 (2010).
- [25] Rico, A., M. Hernández, J. Olcina y E. Martínez Percepción del riesgo de inundaciones en municipios litorales alicantinos: ¿aumento de la vulnerabilidad?, Papeles de Geografía, pp. 245-256 (2010).
- [26] Terpstra. T. y J. Gutteling Households' Perceived Responsibilities in Flood Risk Management in The Netherlands, International Journal of Water Resources Development, 24, Taylor & Francis Group, Twente, pp. 555—565. (2008).
- [27] EDM. Atlas de inundaciones del estado de México. Gobierno del Estado de México. Toluca (2007).
- [28] El Sol de Morelia. Edición del 5 de febrero de 2010.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

# Convocatoria maestrías 2015

A Ingenieros, Arquitectos y Profesionistas de áreas afines, interesados en cursar

## Maestría en Ingeniería:

con opción terminal en:

- ▶ Ambiental
- ▶ Construcción
- ▶ Estructuras
- ▶ Geotecnia
- ▶ Sistemas Eléctricos de Potencia
- ▶ Tránsito y Transporte

## y Maestría en

- ▶ Valuación

## Requisitos

El curso se llevará a cabo los Viernes de 17:00 a 21:00 hrs. y Sábados de 8:00 a 14:00 hrs. Los aspirantes a inscribirse al curso propedéutico y que ya se hayan entrevistado con el coordinador de la maestría de su interés, deben acudir a la Secretaría de Investigación y Estudios de posgrado ubicada en el edificio 180B planta alta, del 9 de junio al 11 de julio de Lunes a Viernes de 9:00 a 15:00 hrs. para entregar la siguiente documentación:

- Formato de admisión que deberá solicitar al correo posgradoicv@yahoo.com.mx.
- **Titulo profesional\***.
- **Cédula profesional\***.
- **Acta de nacimiento\***.
- Certificado de calificaciones de Licenciatura (promedio mínimo de 8.0), si no aparece su promedio general, es necesario una constancia de promedio del programa de licenciatura.
- Curriculum vitae resumido (una cuartilla).
- CURP.
- 2 fotografías tamaño infantil blanco y negro.
- Cursar y aprobar con calificación mínima de 8.0 las materias del curso propedéutico.
- Alumnos extranjeros (documentos apostillados o legalizados en la embajada de su país).
- Pago de derechos (imprimir su ficha bancaria en la página [www.ingenieria.buap.mx](http://www.ingenieria.buap.mx) - sistema de pagos referenciados).

\* copia notarial en tamaño carta de buena calidad

## Informes:

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería,  
Edificio 108 B, planta alta, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue.  
Teléfonos: (222) 229-5500 ext. 7618, \* Correo electrónico: posgradoicv@yahoo.com.mx

[www.ingenieria.buap.mx](http://www.ingenieria.buap.mx)

## ACREDITACIONES

Nuestro programa de la Licenciatura en Ingeniería Civil cuenta con reconocimiento vigente del Consejo para la Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), organismo reconocido por COPAES para la evaluación de programas de Ingeniería.

**CACEI**

EL CONSEJO DE ACREDITACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA A.C.  
RECONOCIDO POR EL CONSEJO PARA LA ACREDITACIÓN DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, A.C.

**ACREDITA**

*AL PROGRAMA DE*

*INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA*

*DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA*

*DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA*

DEL DÍA 15 DE DICIEMBRE DEL 2011 AL 14 DE DICIEMBRE DEL 2016  
POR CUMPLIR CON LOS REQUISITOS DE CALIDAD EDUCATIVA  
ESTABLECIDOS POR EL CACEI.

México, D.F. a 15 de Diciembre del 2011

  
Ing. Fernando Ocampo Canabal  
Presidente del Consejo Directivo

ACTA No. 1177



# Clasificación del subsuelo en función de la velocidad de la onda sísmica de corte

Gabriel Jiménez Suárez, Edgar Iram Villagrán Arroyo,  
Joaquín Lozano Mercado, Ana Elena Posada Sánchez

## RESUMEN

En un evento sísmico las zonas en que las edificaciones resultan más dañadas son las que presentan los llamados efectos de sitio. Una de las características de los efectos de sitio es la amplificación dinámica del movimiento sísmico del subsuelo y se origina debido al contraste de impedancias entre los estratos a través de los cuales se propagan las ondas sísmicas de corte. Las zonas en que se presenta amplificación dinámica están formadas por depósitos de suelos cohesivos blandos y arenas sueltas. Debido a la amplificación las aceleraciones en terreno blando son de mayor magnitud que en roca o en terreno rígido. Se propone clasificar el subsuelo de las zonas urbanas en función de la velocidad de la onda de corte, para identificar y caracterizar los suelos en función de su respuesta sísmica.

**Palabras Clave:** Ondas sísmicas, aceleraciones de terreno, velocidad de la onda de corte

## ABSTRACT

In a seismic event areas where buildings are most damaged are those with so-called site effects. One of the characteristics of the site effects is the dynamic amplification and subsurface seismic originates due to the impedance contrast between the layers through which the seismic waves propagate cutting. Dynamic areas where amplification occurs deposits are formed by soft cohesive soils and loose sands. Because amplification on soft ground accelerations are of greater magnitude than in hard ground or rock. It is proposed to classify the subsoil of urban areas depending on the velocity of shear wave to identify and characterize soils according to their seismic response.

**Keywords:** Seismic waves, ground accelerations, velocity of shear.

## 1 INTRODUCCIÓN

En varias ciudades situadas en regiones de alta sismicidad cuando ocurre un sismo el colapso de estructuras puentes, edificios, y los daños de mayor intensidad en las estructuras y la pérdida de vidas ocurren en zonas bien delimitadas. Ejemplo la ciudad de México

Recibido: 12 de agosto, 2014; aceptado 22 de septiembre, 2014.

Dr. Gabriel JIMÉNEZ SUÁREZ  
M.I. Edgar Iram VILLAGRÁN ARROYO  
Dr. Joaquín LOZANO MERCADO  
M.I. Ana Elena POSADA SÁNCHEZ

Profesores investigadores, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

1957 y 1985, Loma Prieta California 1989, Kobe Japón 1995, etc.

Un amplio grupo de investigadores de diversas disciplinas se hicieron la pregunta, ¿cuál es la causa que determina la distribución geográfica de los daños? La respuesta más general se debe a la influencia de la estratigrafía superficial, lo cual se conoce como efectos de sitio, una de las principales manifestaciones de los efectos de sitio es la amplificación sísmica del movimiento del terreno. (Anderson et al. 1986, Holzer 1994).

La intensidad de los daños en las estructuras y la pérdida de vidas por colapso de las estructuras se pueden reducir incorporando los efectos de sitio en el diseño sísmico de estructuras a través de los espectros de respuesta de diseño elástico.

Para reducir el riesgo sísmico e identificar zonas cuya respuesta sísmica está caracterizada por efectos de sitio, contamos con modernos reglamentos de construcción, como lo son: el Eurocodigo (CEN 2004) en Europa, el International Building Code (ICC 2012) en Estados Unidos, y el de la National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP 1994). Estos reglamentos han establecido clasificaciones del subsuelo en zonas urbanas basadas en la velocidad de las ondas de corte.

## 2 EFECTOS DE SITIO

La alteración de las ondas sísmicas a causa de las características de la geología superficial se denomina efectos de sitio. Es un efecto típico en depósitos de suelos cohesivos blandos y suelos granulares sueltos. Los efectos de sitio se originan por las propiedades del suelo y factores esencialmente geológicos:

- Propiedades elásticas y dinámicas de los suelos.
  - a) Módulo de rigidez al corte.
  - b) Velocidad de la onda de corte.
  - c) Amortiguamiento del suelo.
  - d) Densidad del suelo.
- Propiedades del medio geológico
  - a) Ángulo de buzamiento de los estratos.
  - b) Excesivas reflexiones de las ondas de corte entre estratos, quedando atrapadas las ondas, y cuando coinciden una onda reflejada e incidente se suman sus amplitudes. Entre más estratos existan mayores reflexiones y refracciones se presentan.
  - c) La posición de la cuenca sedimentaria con respecto al foco sísmico.
  - d) El ángulo del talud de la roca firme que contiene los sedimentos blandos.
  - e) La topografía del terreno, en colinas o lomas aisladas son evidentes los efectos de sitio, las ondas sísmicas quedan atrapadas generando mayores aceleraciones que en terreno plano.
  - f) Espesor de la columna estratigráfica de los suelos blandos (Anbazhagan, 2013).
  - g) Ruta de propagación de las ondas del foco al sitio de interés.

## 3 AMPLIFICACIÓN DINÁMICA

Como consecuencia de los efectos de sitio se tiene la amplificación del movimiento sísmico en superficie y se debe al aumento en la amplitud de las ondas sísmicas

horizontales de corte, al propagarse de rocas o suelos rígidos a terrenos blandos.

Las dos formas más comunes para estimar el factor de amplificación de las ondas sísmicas de corte es realizar el cociente espectral H/V (espectro de Fourier horizontal entre el espectro Fourier vertical) en una misma estación, (Lermo y Chávez-García, 1993), la otra es el cociente espectral estándar, la componente horizontal del espectro de Fourier en terreno blando entre el espectro de Fourier en terreno rígido o roca llamada estación de referencia. En ambas técnicas se obtiene una función de transferencia empírica.

La amplificación del movimiento sísmico del suelo es la condición sismo-mecánica responsable del daño a las estructuras cimentadas sobre depósitos de suelos cohesivos blandos y arenas sueltas debido a la mayor magnitud de las aceleraciones, desplazamientos horizontales del terreno, mayor tiempo de duración del movimiento y periodos de vibración más largos.

Dos mecanismos contribuyen al origen de la amplificación de las ondas sísmicas de corte cerca de la superficie.

El primero es la amplificación debida a los contrastes de impedancia entre dos medios uno blando que yace sobre otro rígido a través de los cuales se propagan las ondas de corte. La primera amplificación ocurre entre la roca base y el primer estrato de suelo, la magnitud de la amplificación depende del cociente de impedancias entre roca y suelo. A mayor rigidez y resistencia al esfuerzo cortante de un geomaterial mayor es la densidad y la velocidad de la onda de corte, e inversamente entre menor rigidez y resistencia al esfuerzo cortante menor es la densidad y velocidad de la onda de corte. En sitios en donde la roca basal es una roca ígnea o metamórfica, que son las más resistentes y rígidas, será mayor la amplificación que en sitios en donde la roca base sea una roca sedimentaria de menor módulo de rigidez. La impedancia se define como  $I = \rho V$ , donde  $\rho$  es la densidad del estrato,  $V$  velocidad de la onda de corte, físicamente la impedancia es la resistencia del estrato al movimiento sísmico

$$I_C = \frac{\rho_R V_R}{\rho_S V_S}, V_R > V_S, \text{ y } \rho_R > \rho_S$$

El subíndice  $R$  indica velocidad y densidad en la roca y el subíndice  $S$  se refiere a suelo.

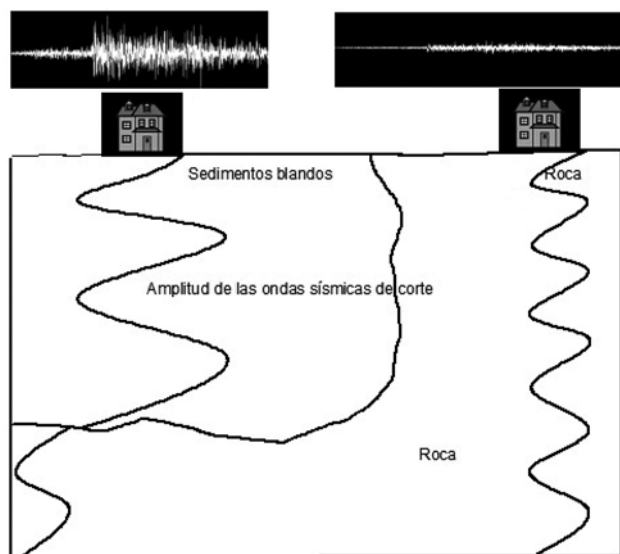
El segundo mecanismo responsable de la amplificación, es la amplificación por resonancia, la frecuencia de las ondas sísmicas coincide con la frecuencia natural de vibración del depósito de suelo, la frecuencia del depósito de suelo se calcula por medio de la expresión:

$$f_n = \frac{V_s}{4H}$$

$V_s$  Velocidad de la onda de corte en el suelo,  $H$  espesor del estrato y  $f_n$  es la frecuencia natural del depósito sedimentario en Hz.

La onda elástica al propagarse a través de un material rígido tiene un flujo de energía  $V_R V u^2 = \rho V s u^2$  en donde  $u$ , es la velocidad de la partícula del suelo, al propagarse en un medio blando, disminuye la densidad y la velocidad de la onda de corte para conservarse el flujo de energía, la velocidad de la partícula de suelo debe aumentar de ahí las grandes aceleraciones y desplazamientos del terreno blando en superficie.

En la figura 1 se muestran las aceleraciones registradas en terreno blando, se caracterizan por ser de mayor magnitud y duración que las aceleraciones registradas en roca. En consecuencia las estructuras geotécnicas y edificaciones están sujetas en terreno blando a aceleraciones de mayor magnitud y duración que en roca. En terreno blando la amplitud de las ondas sísmicas de corte es marcadamente mayor que la amplitud de las ondas en roca o terreno rígido.



**Figura 1.** Amplificación sísmica debido a las condiciones de la geología superficial.

#### 4 DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS POR LOS EFECTOS DE SITIO

Las ondas sísmicas de corte desplazan el terreno y a las estructuras horizontalmente, en consecuencia fuerzas de inercia horizontales se oponen a que la estructura salga de su estado de reposo y actúan sobre los elementos estructurales muros y columnas en dirección contraria a la aceleración del terreno,

las fuerzas de inercia que actúan sobre la estructura son proporcionales a la aceleración del terreno y a la masa de la estructura, su magnitud se determina por la expresión

$$F = ma$$

$F$  = fuerza de inercia

$m$  = masa de la estructura

$a$  = aceleración del terreno

Lógicamente se desarrollan fuerzas de inercia de mayor magnitud en estructuras desplantadas en terreno blando y con mayor peso que en estructuras ligeras, también influyen la magnitud de las cargas vivas que se encuentren en el momento en que ocurra el sismo. Entre menor rigidez tiene un suelo, durante un sismo adquiere mayor aceleración, y en consecuencia mayor fuerza de inercia horizontal actúa sobre la estructura.

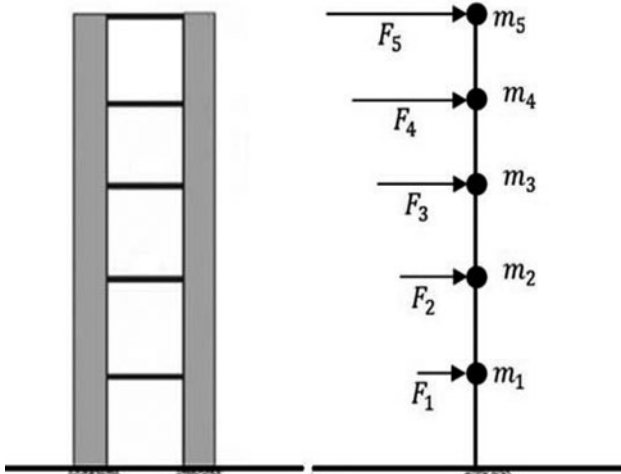
La causa más frecuente de colapso de edificios es la deficiente resistencia a carga lateral de elementos estructurales verticales, columnas y muros (Bazan y Meli, 2011). Las uniones viga columna o losa columna que tienen la función de resistir las fuerzas de inercia presentan elevadas concentraciones de esfuerzo que originan frecuentes fallas.

Es importante comprender que para una estructura es más dañino un ciclo moderado de aceleraciones que un pico de alta aceleración de muy poca duración, la frecuencia es otro parámetro potencialmente destructivo debido a que si la frecuencia de las ondas sísmicas coincide con el periodo dominante del suelo se produce resonancia tornándose las deformaciones del terreno muy grandes produciendo grietas y perdiendo la capacidad de carga del terreno, generando el vuelco de la estructura.

Particularmente estructuras antiguas sufren daños más severos si en un sismo se produce amplificación debido a que no eran diseñadas para resistir grandes fuerzas laterales.

#### 5 CLASIFICACIÓN DE ZONAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE

El principal parámetro utilizado para la clasificación de zonas es la velocidad promedio de la onda de corte desde la superficie hasta una profundidad de 30 m  $V_{s,30}$ , este parámetro fue propuesto por Borchardt (1994). La razón por la cual se escoge una profundidad de 30 m es debido a que los estudios de mecánica de suelos y la profundidad de desplante de las cimentaciones por medio de pilotes para edificios altos en terreno blando alcanzan aproximadamente esa profundidad.



**Figura 2.** Las fuerzas de inercia en las estructuras son proporcionales a la aceleración del terreno.

La importante función de la velocidad de las ondas sísmicas horizontales de corte en la amplificación sísmica, periodo dominante del terreno, aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno, ha sido observado por varios investigadores (Borcherdt, 1994), y ha llevado a utilizar este parámetro como referencia para construir sistemas para clasificar zonas. La clasificación de zonas en función de la velocidad de las ondas sísmicas de corte sirve como criterio identificar zonas en que se presenta amplificación dinámica y diseñar espectros elásticos de respuesta para el análisis sísmico de estructuras. Esta zonificación debe aparecer en los reglamentos de diseño por sismo emitiendo recomendaciones para la determinación de parámetros dinámicos del suelo e influyendo en el programa de exploración y muestreo de suelos, en cuanto a la profundidad de los sondeos exploratorios. La onda de corte origina desplazamientos del terreno perpendiculares al sentido de su propagación. La ecuación vectorial de las ondas de corte en tres dimensiones es:

$$\nabla^2 \gamma(X, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \gamma(X, t)}{\partial t^2}$$

Donde

$\gamma$  = Rotacional del vector potencial  
 $v$  = velocidad de la ondas de corte.

La solución de la ecuación vectorial de la onda plana armónica es:

$$\gamma(X, t) = A \exp(i(\omega t - K \cdot X))$$

Donde  $K = K_x, K_y, K_z$

La solución de la ecuación vectorial es función de las coordenadas y el tiempo, pero identificar e incorporar las propiedades del medio a través del cual se

propaga la onda, a la ecuación, esta identificación se realiza a través de la velocidad de la onda de corte.

La velocidad de las ondas de corte mediante parámetros determinados en laboratorio se determina por la expresión:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Donde:

$G$  = Módulo de rigidez al corte, pendiente de la curva esfuerzo deformación mediante la aplicación de esfuerzo cortante.

$\rho$  = Densidad del suelo o roca.

La velocidad de la onda de corte horizontal es la onda sísmica que más causa daños al terreno y a las estructuras, el efecto sobre el terreno es su deformación por cortante, aunque no contribuye a su cambio de volumen.

Los sitios en que su estratigrafía superficial presenta las velocidades más bajas de la velocidad de la onda de corte, son sitios en que presentan mayor amplificación sísmica del terreno.

La medición de la velocidad sísmica de corte de forma más precisa se realiza en forma directa en campo por métodos geofísicos. Una de las formas más fáciles y prácticas de estimar la velocidad de las ondas de corte por los ingenieros geotecnistas es la prueba de penetración estándar, correlacionando estadísticamente el número golpes con la velocidad de la onda de corte, como toda correlación tiene un margen de error. Otra herramienta exploratoria es el cono eléctrico estático, que mide la resistencia de punta y la fricción y estos valores son correlacionables en suelos blandos con la velocidad de la onda de corte del suelo.

La velocidad promedio de las ondas de corte debe calcularse con la siguiente expresión:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^h h_i}{\sum_{i=1}^h \frac{h_i}{V_{si}}} = \frac{30 \text{ m}}{\sum_{i=1}^h \frac{h_i}{V_{si}}}$$

$h_i$  = espesor de los estratos en los últimos 30 metros

$V_{si}$  = Velocidad en cada uno de los estratos en los últimos 30 m antes de alcanzar la superficie.

La primera acción para clasificar una zona en función de la velocidad de las ondas de corte es realizar la zonificación geotécnica de la ciudad que comprende la clasificación e identificación de rocas y suelos, columna estratigráfica, edad, espesor, buzamiento de los estratos, nivel del agua subterránea. Es decir una descripción de materiales que se adapte a la amplia variedad de condiciones físico-mecánicas en que se

encuentran las rocas y suelos producto del ambiente geológico y climático de una región.

Como segunda acción es la estimación, del perfil de velocidades de la onda de corte de una zona.

Como tercera acción es la vinculación entre la columna estratigráfica a 30 metros de profundidad con el perfil de velocidad de las ondas de corte. Como ejemplo se presenta una clasificación de sitios en función de la velocidad media de las ondas de corte a una profundidad de 30 m.

**Tabla 1.** Clasificación de sitios en función de la onda de corte (NEHRP, 1994, 1997; UBC, 1997)

Tipo de terreno	$V_s$	N
Roca dura	1500 m/s	
Roca	760 m/s < 1500 m/s	
Suelo granulares compactos, roca blanda	360 m/s < 760 m/s	> 50
Suelos rígidos	180 m/s < 360 m/s	15 < N < 50
Arcillas plásticas blandas	< 180 m/s	15 < N

Donde N representa el número de golpes en la prueba de penetración estándar.

En este trabajo se propone un sistema de clasificación de sitios que incluya además de la velocidad media de las ondas de corte, los parámetros de resistencia a la compresión simple para roca, resistencia al esfuerzo cortante del suelo en prueba triaxial no drenada, y la compacidad relativa de la arena, parámetros relacionados con el módulo de rigidez por medio del Módulo de Young y en consecuencia con la velocidad de la onda de corte. En campo los anteriores parámetros se pueden obtener por correlación por medio de la prueba de penetración estándar (tabla 2).

## CONCLUSIONES

En los lugares en donde existen efectos de sitio la intensidad de los daños en estructuras es mayor en relación a las zonas en que no existen efectos de sitio.

La amplificación dinámica origina mayores aceleraciones en el terreno, en consecuencia actúan fuerzas de inercia de mayor magnitud sobre las estructuras.

La velocidad de las ondas de corte determina en gran medida la respuesta sísmica del terreno.

La clasificación de zonas en función de la velocidad de las ondas de corte debe incorporarse en los reglamentos de diseño por sismo a través de los espectros de diseño elásticos para cada zona y para todo tipo de estructuras.

La profundidad de los sondeos exploratorios y el tipo de herramienta a utilizar.

## REFERENCIAS

- [1] Anderson, J. G., Bodin, P., Brune, J. N., Prince, J., Singh, S. K., Quass, R., and Onate, M., 1986. Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake, *Science* **233**, 1043–1049.
- [2] Bazan Enrique, Meli Roberto, 2011 Diseño Sísmico de Edificios Editorial Limusa S.A. de C.V. Mexico.
- [3] Borcherdt, R.D., 1994, New developments in estimating site effects on ground motion, Proceedings of Seminar on New Developments in Earthquake Ground Motion Estimation and Implications for Engineering Design Practice, Applied Technology Council 35-1, pp. 101-1 – 10-44.
- [4] Holzer, T. L., 1994. Loma Prieta damage largely attributed to enhanced ground shaking, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* **75** (26), 299–301.
- [5] ICC(International Code Council (2012) International building code. International Code Council. Inc. [www.iccsafe.org/Pages/Default.aspx](http://www.iccsafe.org/Pages/Default.aspx)
- [6] Lermo, J. and F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism.Soc. Am*, 83: 1574-1594.
- [7] NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, 1997 Edition, 1998, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., *FEMA 302, FEMA 303*.
- [8] P. Anbazhagan, M.ASCE; M. Neaz Sheikh; and Aditya Parihar. 2013 Influence of Rock Depth on Seismic Site Classification for Shallow Bedrock Regions. *Natural Hazards Review* 14:108-121.

**Tabla 2.**

Tipo y características del material	Resistencia Compresión simple qu Kn/m <sup>2</sup>	Resistencia no drenada en suelos	Compacidad relativa %	N Numero de golpes PPE	$V_s$ m/s

## ACREDITACIONES

Nuestro programa de la Licenciatura en Ingeniería Civil cuenta con reconocimiento vigente del Consejo para la Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), organismo reconocido por COPAES para la evaluación de programas de Ingeniería.

**CACEI**

EL CONSEJO DE ACREDITACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA A.C.  
RECONOCIDO POR EL CONSEJO PARA LA ACREDITACIÓN DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, A.C.

**ACREDITA**

*AL PROGRAMA DE*

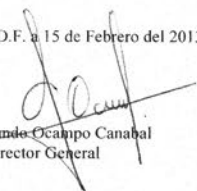
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

DEL DÍA 15 DE FEBRERO DEL 2013 AL 14 DE FEBRERO DEL 2018 POR  
CUMPLIR CON LOS REQUISITOS DE CALIDAD EDUCATIVA  
ESTABLECIDOS POR EL CACEI.

México, D.F. a 15 de Febrero del 2013

  
Ing. Fernando Ocaño Canabal  
Director General

ACTA No. 1406





## Análisis de la línea 12 del Metro

M. A. Cruz Gómez, S. Calderón González, J. Zilch Hernández,  
J. S. Martínez Martínez, J. A. Oropeza Piñán.

### RESUMEN

Esta investigación analizó cronológicamente el diseño y construcción de la Línea 12 del Metro. El objetivo fue formular un criterio fundamentado en la ingeniería, que permita evaluar la causa de la corrugación en las vías metálicas, así como las soluciones propuestas por compañías que fueron contratadas por el Gobierno Federal con el fin de optimizar las soluciones factibles para que el sistema pueda ser funcional. La problemática de la corrugación sobre vías metálicas de la Línea 12 del S.T.C. Metro (Sistema de Transporte Colectivo Metro, México D.F.) empezó con una mala estrategia de diseño que fue modificada por diferentes intereses en la trayectoria original, cambiando la obra planteada inicialmente en 40%. La obra una vez definida fue asignada a un consorcio constructor, quienes al ejecutar la obra se enfrentaron a nuevos cambios en la trayectoria por no poder pactar el desalojo de zonas habitacionales y debido a recomendaciones del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), cambiando la obra en un 20% más.

Una vez culminada la obra a los pocos meses, 12 de las 20 estaciones fueron cerradas por riesgo al descarrilamiento. La reacción Gubernamental y del S.T.C. Metro fue deslindar responsabilidades de las compañías y servidores públicos involucrados en la magna obra, contratando a la empresa francesa Systra dedicada a peritajes de Sistemas Ferroviarios en más de 78 países. Esta recomendó 32 acciones para la rehabilitación y puesta en operación de la Línea 12, sustituyendo 312, 000 piezas en el tramo elevado afectado, mismas que se deberán mandar a hacer por fabricantes especializados para cumplir con la fecha de entrega de la obra programada para noviembre de 2015, sin embargo el Funcionario Capitalino comentó que “podría trasladarse hasta 2016”.

**Palabras clave:** Metro, línea 12, corrugación, coeficientes de fricción.

### ABSTRACT

This research analyzed chronologically the design and construction of Metro Line 12. The objective was to formulate a criterion based on engineering, to possible to assess the cause of the corrugation on metallic tracks, as well as the solutions proposed by companies that were contracted by the Federal Government with order to optimize the feasible solutions for the system can be functional. The problem of corrugation on metallic tracks of Line 12 of the STC Metro (Public Transport System Metro, Mexico City) began with a bad design strategy that was modified by different interests in the original trajectory, changing the work initially raised by 40%. The work once defined was assigned to a construction consortium, who to perform the work clashed with new changes in the trajectory for not being able agree on the evicted from residential areas and due to recommendations from the National Institute of Anthropology and History (INAH), changing work by 20% more.

Upon completion of the work a few months later, 12 of the 20 stations were closed by derailment risk. The Government reaction and S.T.C. Metro was to determine responsibilities of companies and public officials involved in the great work, hiring French company Systra dedicated to expert reports in Railway Systems in over 78 countries. This recommended 32 actions for the rehabilitation and startup of Line 12, replacing 312, 000 pieces in the affected stretch elevated, same ones that should be send to make by specialized manufacturers order to comply with the delivery date of the work scheduled for November 2015, however the Capital One's Government commented that “could move to 2016”.

**Keywords:** Metro, line 12, corrugation, friction coefficients.

## 1 INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2006 durante la parte final del periodo de Florencia Serranía Soto, Directora del Sistema de Transporte Colectivo Metro, se anunció la posible construcción de una nueva línea del Metro, al sur de la Ciudad de México. El 29 de julio de 2007 se aplicó la encuesta Consulta Verde a la población de la Ciudad de México, su objetivo fue recabar la opinión sobre transporte público; manejo del agua; medio ambiente y definir el trazo de la línea 12 del Metro. La encuesta propuso dos posibles rutas: Iztapalapa-Acoxta e Iztapalapa-Tláhuac. El 7 de agosto de 2007 se dio a conocer que la ruta elegida fue Iztapalapa-Tláhuac. El 8 de agosto de 2007 se presentó el proyecto de manera oficial ante la población con el nombre de Línea 12.

La Línea 12 es la duodécima línea del Metro de la Ciudad de México, su color distintivo de identidad gráfica es el oro por motivo de la celebración del Bicentenario de la Independencia de México y el Centenario de la Revolución Mexicana. Esta emplea siete vagones por convoy con trenes de rodadura férrea alimentados por catenaria [1], construidos por la empresa Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles en España [2].

La construcción de este medio de transporte fue llevado a cabo por las Empresas ICA, S.A. de C.V., Alstom Transport S.A., Alstom Mexicana S.A. de C.V., Carso Infraestructura y Construcción S.A. de C.V. Quienes firmaron contrato con el Gobierno del Distrito Federal, el 17 de junio de 2008 [3, 4].

Desde la presentación oficial el 8 de agosto de 2007, por parte de las autoridades del Gobierno del Distrito Federal la Línea 12 del Metro, sufrió diversas modificaciones al proyecto que incluyeron: ruta; cantidad y nombre de estaciones; inicio y terminación de la obra civil; y tipo de construcción [5, 6].

Inicialmente la trayectoria de la línea 12 iniciaría en territorio de la delegación Tláhuac, se incorporaría a la Av. Tláhuac en dirección poniente. Seguiría

por Calzada de la Virgen, las calles Canal Nacional, Cafetales hasta entroncar con el Eje 3 Oriente (Av. Carlota Armero) llegando al cruce con la Calzada Ermita-Iztapalapa. En ese punto giraría hacia el poniente hasta llegar al cruce con la Av. División del Norte, lugar donde varió hacia el norte hasta el Eje 7 Sur donde nuevamente fue cambiada hacia el poniente hasta la estación Mixcoac [7, 8].

El proyecto inicial consideró más de 24 km de subterráneo con 23 estaciones: Tláhuac, Tlaltenco, Zapotitlán, Francisco Villa, Olivos, Tezonco, Periférico Oriente, Calle 11, La Virgen, ESIME Culhuacán, Canal Nacional, Ganaderos, Del Paso, Mexicaltzingo, Vía Láctea, Sur 69, Ermita, Eje Central, Parque de los Venados, Zapata, 20 de noviembre, Insurgentes Sur y Mixcoac [5]. La Línea 12 tiene correspondencias con la estación Atlalilco con la Línea 8, en la estación Ermita con la Línea 2, en la estación Zapata de la Línea 3 y en Mixcoac de la Línea 7 [9].

El 6 de enero de 2008 el Sistema de Transporte Colectivo dio a conocer la cancelación de la estación Sur 69 por oposición vecinal [10]. El 11 de septiembre de 2008 anunciaron la cancelación de las estaciones Vía Láctea y Ganaderos debido a recomendaciones del Instituto Nacional de Antropología e Historia [11]. En el cruce de la Calzada Ermita-Iztapalapa y la Av. Arneses se planeó construir la estación Axomulco (originalmente llamada Del Paso). La estación funcionaría como transbordo hacia la línea 8, para lo cual, se tendría que construir una estación sobre el trazo de esta última línea. Francisco Bojórquez Hernández, Director del Sistema de Transporte Colectivo, reconoció que la construcción de una estación sobre el trazo de la línea 8 implicaría el cierre de la línea por casi 6 meses, por tal motivo, se procedió a cancelar la estación Axomulco y únicamente construir una sola estación para efectuar el transbordo hacia la estación Atlalilco, la cual ya existe [12].

Seis estaciones fueron renombradas por autoridades del Sistema de Transporte Colectivo. La estación Francisco Villa se renombró de manera definitiva a Nopalera [13]. Las cinco estaciones restantes fueron nombradas, durante la construcción, con dos o más nombres: Canal Nacional (Barrio Tula, Pueblo Culhuacán o Culhuacán), Tezonco (San Lorenzo o San Lorenzo Tezonco), La Virgen (Tomatlán o Santa María Tomatlán), ESIME Culhuacán (San Andrés Tomatlán), Calle 11 (Tomatlán), Insurgentes Sur (Parque hundido) [5, 14, 15].

La licitación publicada el 21 de enero de 2008 indicó las siguientes fechas: 10 de junio de 2008 para

---

Recibido: 27 de julio, 2014; aceptado 18 de septiembre, 2014.

M. A. CRUZ GÓMEZ, S. CALDERÓN GONZÁLEZ, J. ZILCH HERNÁNDEZ, J. S. MARTÍNEZ MARTÍNEZ, J.A. OROPEZA PIÑÁN.

Correo electrónico: marco.cruz@correo.buap.mx  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería, Grupo de Tribología y Transporte, Edificio de Posgrado, Primer nivel, Cubículo Núm. 16, Blvd. Valsequillo esq. Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, CP. 72570, Puebla, Pue. Tel. 229 5500, Ext. 7610.

inicio y 31 de diciembre de 2010 para terminación del tramo Tláhuac-Axomulco; y 31 de diciembre de 2011 para terminación del tramo Axomulco-Mixcoac. Posteriormente, se anunciaron tres fechas más para el inicio de la obra: 3 de julio, 15 de septiembre y 22 de septiembre de 2008. Las fechas de terminación de la obra también sufrieron cambios: Tláhuac-Atlalilco en abril de 2011 y Atlalilco-Mixcoac en abril de 2012. Finalmente, el 23 de septiembre de 2008 sobre la calzada Ermita-Iztapalapa, en el tramo comprendido entre calzada de La Viga y el Eje 3 Oriente inició la construcción del tramo Tláhuac-Atlalilco [7, 12].

El trazo de la Línea 12 fue modificado en numerosas ocasiones registrando 25.4 km de construcción; 2.8 km en modo superficial, 12 km en viaducto elevado, 2.8 km en cajón subterráneo y 7.8 km en túnel profundo. El proyecto finalmente consideró la construcción de una vía de longitud total de 24,475 km, de los cuales 20,278 km son para el servicio de pasajeros y 4,197 km para servicio de mantenimiento. La vialidad es de oriente a poniente, el formato de vialidad es el siguiente: 2,834 km en modo superficial, 12,068 km en viaducto elevado, 2,807 km en cajón subterráneo y 6,766 km en túnel profundo. Considera el trazo de la línea a través de la Av. Tláhuac desde la Calzada Ermita-Iztapalapa hasta el predio Llanos de Tláhuac [16, 17].

Del 17 de junio al 2 de octubre de 2012 tuvo lugar un período de pruebas que ofreció recorridos gratuitos con ascenso y descenso de pasajeros en algunas de sus estaciones [18]. El 30 de octubre del 2012 inauguró la mega obra Marcelo Ebrard Casaubón, Jefe de Gobierno del Distrito Federal de 2006 - 2012 y Felipe Calderón Hinojosa, Presidente de México de 2006 a 2012 [19]. Horcasitas recibió la certificación de la empresa internacional ILF (Consulting engineers) que dio el visto bueno para que la línea comenzara a operar, iniciando el primer recorrido formal de la Línea Dorada.

“En la minuta de esa reunión, Horcasitas le dice a Ortega Cuevas que, en términos de lo dispuesto en la cláusula octava del contrato suscrito con el consorcio constructor, se encuentra garantizada la obligación del contratista de reparar los defectos que resulten de los trabajos realizados, de vicios ocultos y de cualquier anomalía” [20].

El 15 de marzo de 2013, el jefe de Gobierno del Distrito Federal, Miguel Ángel Mancera Espinosa anunció la ampliación de la Línea 12 del Metro hasta la estación Observatorio de la Línea 1, que en un principio sólo llegaría al cruce de Periférico. Afirmo

“vamos a trabajar para conectar el Metro hasta hacerlo llegar al cruce con la estación Observatorio” [21].

El cierre parcial de la línea 12 representó un hecho inédito en la historia del Metro de la Ciudad de México a los pocos meses de su inauguración, debido a la presencia de fallas severas en su infraestructura. El *Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC Metro)* solicitó al consorcio constructor la renivelación de los rieles entre las estaciones Culhuacán y Calle 11. La suspensión del servicio de trenes se realizó durante los fines de semana en horarios de libranza de 22:00 a 4:00 hrs. entre el 2 de agosto y el 30 de noviembre de 2013 [22].

El Jefe de Gobierno del Distrito Federal Miguel Ángel Mancera ordenó a la RTP (Red de Transporte de Pasajeros del D.F.) ofrecer servicio de transporte gratuito entre las estaciones Atlalilco y Periférico Oriente, en ambos sentidos, para atender la demanda de usuarios durante el periodo de mantenimiento [22, 23]. La Línea 12 mostró una afluencia total de 91,982,732 pasajeros en 2013.

El 4 de octubre de 2013, inició otro periodo de mantenimiento desde la estación terminal Tláhuac hasta Tezonco. El mantenimiento se realizó los fines de semana en los horarios de libranza. Autobuses de la RTP ofrecieron servicio gratuito en ambos sentidos desde la estación Tláhuac hasta Periférico Oriente [24].

El 17 de febrero de 2014 inició un período de mantenimiento que se efectuó diariamente en los horarios de; lunes a viernes entre 01:00 y 04:00 hrs., sábados de 01:00 a 05:00 hrs., domingos de 01:00 a 06:00 hrs. Los mantenimientos fueron enfocados a renivelación y reajuste de los rieles, compactación del balasto, apriete y/o sustitución de los elementos de sujeción de rieles y durmientes [25].

El Jefe de Gobierno del Distrito Federal Miguel Ángel Mancera y Joel Ortega Cuevas, Director del Sistema de Transporte Colectivo, decidieron operar los trenes a una velocidad menor a los 35 Km/h denominada *marcha de seguridad*, en consecuencia se registró un incremento entre 7 y 10 minutos más en el tiempo de recorrido total [25, 26].

El 11 de marzo de 2014 Joel Ortega Cuevas, director del *STC Metro*, anunció la suspensión del servicio por tiempo indefinido entre la terminal Tláhuac y la estación Culhuacán. El 12 de marzo de 2014 admitió que el servicio no podía continuar debido a graves fallas en el tramo elevado lo que incrementaba las posibilidades de descarrilamiento de los trenes [27, 28]. Algunos medios de comunicación mostraron fotografías y videos donde se apreciaban: [29, 30, 31].

- Durmientes de concreto fracturados longitudinalmente.
- Elementos de sujeción fracturados.
- Desgaste ondulatorio en rieles.
- Desgaste en las ruedas de acero de los trenes.

Como consecuencia de la suspensión del servicio, autoridades del Gobierno del Distrito Federal, exfuncionarios de la administración 2006-2012 y representantes del consorcio constructor, se culparon mutuamente por las fallas en la línea 12. Esto provocó que el 18 de marzo de 2014, la Asamblea Legislativa del Distrito Federal creara una comisión para determinar las causas que originaron las fallas. Esta comisión quedó integrada por 15 diputados de todas las fracciones políticas y presidida por el diputado Jorge Gaviño Ambríz [32].

El 19 de marzo de 2014 el Director del *Proyecto Metro del Distrito Federal*, Enrique Horcasitas, fue removido de su cargo por Miguel Ángel Mancera, bajo el argumento de garantizar una investigación transparente sobre las fallas en la línea 12 [33]. Posteriormente, la comisión creada por la Asamblea Legislativa ordenó la comparecencia de los siguientes exfuncionarios y particulares:

- Enrique Horcasitas. Exdirector del *Proyecto Metro del Distrito Federal* (20 de marzo de 2014) [34].
- Joel Ortega Cuevas. Director del *Sistema de Transporte Colectivo* (21 de marzo de 2014) [35].
- Francisco Bojórquez Hernández. Exdirector del *Sistema de Transporte Colectivo* (24 de marzo de 2014) [36].
- Grupo ICA S.A. de C.V., Alstom Mexicana S.A. de C.V. y Grupo Carso S.A. de C.V., consorcio constructor de la línea 12 (1 de abril de 2014) [37].
- DB International, ILF Baratende, Tuv Sud Rail y Hamburg Consult, consorcio certificador de la Línea 12 (2 de abril de 2014) [38].
- Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles S. A., empresa constructora del material rodante (4 de abril de 2014) [38].
- Impulsora Tlaxcalteca de Industrias S. A. de C.V., supervisora de obra (9 de abril de 2014) [38].

En una entrevista ofrecida a los medios de comunicación Miguel Ángel Mancera mencionó que entregará el dictamen técnico solicitado a las empresas europeas *Triacaud Société Organisé* y *Eurovia Travaux Ferroviaires* [39] a la Contraloría General del Distrito Federal, la cual también realiza un estudio

técnico asesorada por la empresa *SGS*. Hiram Almeida Estrada, titular de la contraloría, mencionó que el objetivo de estos estudios es establecer las responsabilidades correspondientes y permitir la realización de las acciones jurídico-legales que procedan [40, 41].

Semanas más tarde, el 27 de marzo la empresa *Eurovia Travaux Ferroviaires* anunció su retiro de los trabajos de diagnósticos que se llevaron a cabo en la línea 12 por causas desconocidas [42]. Días más tarde la empresa ferroviaria francesa *Systra* fue contratada por el Gobierno del Distrito Federal y reemplazada por *Eurovia Travaux Ferroviaires*. *Systra* continuó trabajando en conjunto con *Triacaud Société Organisé* en los diagnósticos de la línea mencionada.

El 4 de abril de 2014 la Junta de Coordinación Política de la Cámara de Diputados creó una comisión para dar seguimiento a los recursos federales asignados a la construcción de la línea 12 del metro [43]. El 8 de abril de 2014 Joel Ortega compareció ante esta comisión para explicar el destino de los fondos federales asignados a la línea 12 [44].

El 4 de septiembre de 2014, las empresas *Systra* y *TSO* entregaron el diagnóstico realizado por éstas empresas durante varias semanas, que le costó al Gobierno Capitalino 52 millones de pesos, donde se explica las fallas detectadas en la infraestructura, así como la respectiva solución a las mismas y concluyó que hubo errores generales de operación, diseño y mantenimiento en toda la vía; el informe plantea 32 acciones correctivas y la sustitución de al menos 312,000 piezas solo en el tramo detenido. Algunas acciones a ejecutar son las siguientes: [45, 46, 47].

- Modificar el trazo de las curvas 1 y 2 ubicadas en los talleres de la estación Tláhuac, a fin de acrecentar sus radios para que los trenes puedan maniobrar con facilidad.
- Nivelar toda la vía y amoldar los rieles para obtener el perfil con especificación “UIC60”.
- Modificar el perfil de las ruedas de los trenes para ajustarlo a la norma francesa “NF-F-03-402” con una adaptación para obtener un ancho de pestaña de 31.5 mm.
- Sustituir aproximadamente 14,000 m<sup>3</sup> de balasto.
- Sustituir aproximadamente 15,000 metros de riel.
- Modificar el peralte en 15 curvas, de 160 a 100 mm.
- Cambiar aproximadamente 15,000 piezas de fijación (agujas y grapas).
- Sustituir 12,500 durmientes.
- Cambiar agujas en 26 aparatos de vía.

- Hacer 954 soldaduras.
- Esmerilar 3,412 soldaduras con defectos.

*Systra* y *TSO* supervisarán los trabajos de mantenimiento, según expusieron las autoridades del Gobierno del Distrito Federal [48]; también declararon que se requerirá de un proyecto ejecutivo para rehabilitar la Línea, el cual deberá diseñarse por todas las partes involucradas.

El reporte final explica que existieron defectos de concepción en el proyecto como la compatibilidad tren-vía, defectos de calidad de algunos elementos de la vía, deficiencias en el mantenimiento desde la puesta en operación hasta la suspensión de la línea sobre el tramo elevado, así como la falta de gestión adecuada de los problemas”. Detalló que a nivel de la vía detectaron problemas en 15 de 36 curvas con radio menor a 350 metros, situación que dificulta la fluencia del tren y provoca el desgaste ondulatorio [49].

El 01 de Octubre de 2014 informó el Director General de la empresa *Systra* México, Slobodan Petrovich que el desgaste ondulatorio en las vías de la Línea 12 del Metro se podrá controlar con acciones correctivas, pero permanecerá en ellas “de por vida”. Explicó que las medidas correctivas recomendadas por la empresa francesa se harán para “disminuir los esfuerzos” que el tren provoca en las vías, particularmente en las curvas que tienen menos de 350 metros de radio, debido a que el trazo original ya no se puede modificar [50, 51].

El Funcionario Capitalino reiteró que la Línea 12 reabrirá sus servicios totalmente en noviembre de 2015; sin embargo, comentó que “podría trasladarse hasta 2016”, luego de que se apliquen 32 acciones correctivas y se observen las especificaciones técnicas de la empresa *Systra* [52].

El 18 de septiembre de 2014 Miguel Ángel Mancera deslinda a Marcelo Luis Ebrard Casaubón de corrupción en la Línea 12 del Metro e inhabilitan 20 años a Horcasitas por fallas en la línea [53].

El exdirector del STC Metro, Francisco Bojórquez, y el exdirector del Proyecto Metro del Distrito Federal (PMDF), Enrique Horcasitas, encabezan la lista de los 19 funcionarios y exfuncionarios que la Contraloría General del gobierno capitalino investiga por el cierre parcial de la Línea 12. La lista continúa con Reyna María Basilio Ortiz, Directora Ejecutiva de Operación (exdirectora de Administración de Contratos); Juan Armando Rodríguez Lara, Director General de Administración; Filiberto Salazar García, Jefe de Unidad Departamental (JUD) de Obra Civil C. y José Guadalupe Rojas Lizaola, Subdirector de Obra Civil C. quien

fue JUD de Residencia en Obra Civil C1 en la pasada administración y estuvo relacionado con la construcción de las curvas 1, y 2, es decir, el tramo donde se encontró mayor desgaste ondulatorio en las vías [54].

En la lista no aparecen el exjefe de Gobierno, Marcelo Ebrard -quien impulsó el proyecto desde el inicio de su administración e inauguró la obra un mes antes de terminar su cargo-, ni el actual director del Metro, Joel Ortega, pese a que recibió la obra “en condiciones de operar” e incumplió con los protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo, según evidencian dictámenes de empresas certificadoras [55, 56, 57].

El secretario de Obras y Servicios, Alfredo Hernández, informó que la reapertura del servicio será hasta noviembre de 2015, aún no se especifica cuánto costará la reparación ni quién la pagará, debido a que todavía no se resuelve la demanda que el Gobierno del Distrito Federal (GDF) tiene con el consorcio constructor sobre los alcances del contrato y el cobro de la fianza por “vicios ocultos”, que podría ascender a 1,700 millones de pesos [58].

El funcionario capitalino recordó que el contrato de la L-12 requirió una inversión de más de 22,000 millones de pesos de 2007 a 2013. Aclaró que alrededor de 14,300 millones (65%) correspondieron a recursos federales y casi 7,300 millones (33%) a endeudamiento local. Agregó también que el Proyecto Metro del DF ejerció 18,136 millones de pesos de la inversión total, mientras la Secretaría de Obras erogó los 3,875 millones restantes [58]. Alfredo Hernández respondió que en la contratación y pago del PPS no se usaron recursos federales, sólo locales y con un contrato únicamente con el STC Metro, aprobado por unanimidad en la ALDF (Asamblea legislativa del Distrito Federal). Sobre el resultado de la impugnación, dijo que esa información no le corresponde a la dependencia a su cargo [58].

Sobre la indemnización de los vecinos afectados, el titular de Finanzas, Edgar Amador, respondió que para el 2014, el STC Metro tiene presupuesto asignado en la partida Adquisición, Adjudicación, Expropiación, Indemnización de 5.2 millones de pesos para cubrir las afectaciones a 7,532.33 metros cuadrados. Además, se comprometió a llevar la propuesta para que se considere en el ejercicio fiscal de 2015 [58].

El 13 de octubre de 2014 el funcionario aclaró que a reserva de conocer el costo de las obras, la administración capitalina podría hacer ajustes presupuestales en el presente ejercicio fiscal e incluir una prevención por 500 millones de pesos para el próximo año [58].

## 2 DESARROLLO

La corrugación es una irregularidad periódica que se desarrolla en la superficie del riel la cual puede causar ruido excesivo, vibraciones, daños a la estructura de los vagones del metro y descarrilamiento. Este problema se incrementa debido a la interacción entre las características dinámicas de la estructura del vagón y el contacto mecánico rueda-riel desencadenando fallas en cascada. La corrugación puede abarcar longitudes de onda desde el orden de unos pocos centímetros hasta metros, debido a las condiciones dinámicas, además de un daño asociado al desgaste, deformación plástica en la superficie del riel dependiendo de las condiciones del contacto [59].

El nivel de ruido también se incrementa, lo cual genera un serio problema de incomodidad y molestia para los usuarios del transporte, ya que el ruido generado por este tipo de problema es irritante y dañino para los trabajadores y usuarios del metro [60].

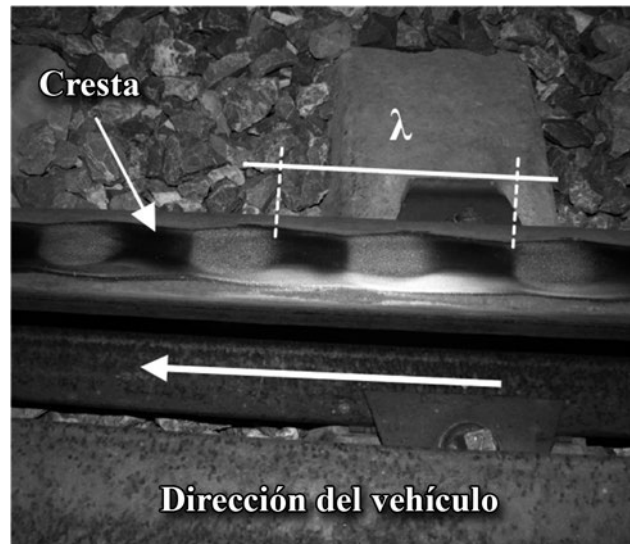
En general a nivel internacional la corrección de la corrugación se realiza mediante un desbaste o remoción de la capa dañada del riel, proceso conocido como reperfilado “grinding” [61]. Es importante señalar que la corrugación no es problema que se deba a una sola causa y por lo tanto solo tenga una solución, cada situación se debe considerar como única y realizar el análisis puntual de la raíz del problema para adoptar técnicas aplicadas previamente y métodos de corrección más efectivos (figura 1).

Según Oyarzabal [60], hay seis diferentes tipos de corrugación, de acuerdo al mecanismo de desgaste y la longitud de onda  $\lambda$ , los cuales se muestran en la tabla 1:

**Tabla 1.** Tipos de corrugación en función de la longitud de onda  $\lambda$ .

Tipo de Corrugación	$\lambda$
Transporte pesado (Heavy haul)	200-300 mm
Tren ligero (Light trail)	500-1500 mm
Durmientes desprendidos (Booted sleepers)	45-60 mm
Fatiga por contacto (Contac fatigue)	150-450 mm
Pista hundida o ranura hecha por el paso de vehículos (Rutting).	50 mm in trams, 150-450 mm in trains
Rechinido del tren (Roaring rail)	25-80 mm

En la figura 2a) se muestra la curva 27 de la vía 2 del tramo elevado de la Línea 12 donde puede observarse la infraestructura para las pistas metálicas y en



**Figura 1.** Características de la corrugación.

la figura 2b) se muestra un convoy en la estación de servicio Tlauhuc. El parque de material rodante que circula en la línea 12 se constituye de 30 trenes FE10. (Realización CAF). Los trenes están constituidos de 7 carros con una longitud total de 141,200 mm: 2 remolques, 5 motores, longitud de las cajas de 19,000 mm, altura de las cajas es de 3,538 mm, anchura de la caja de 2,800 mm, peso del tren es de 2,35 T vacío.

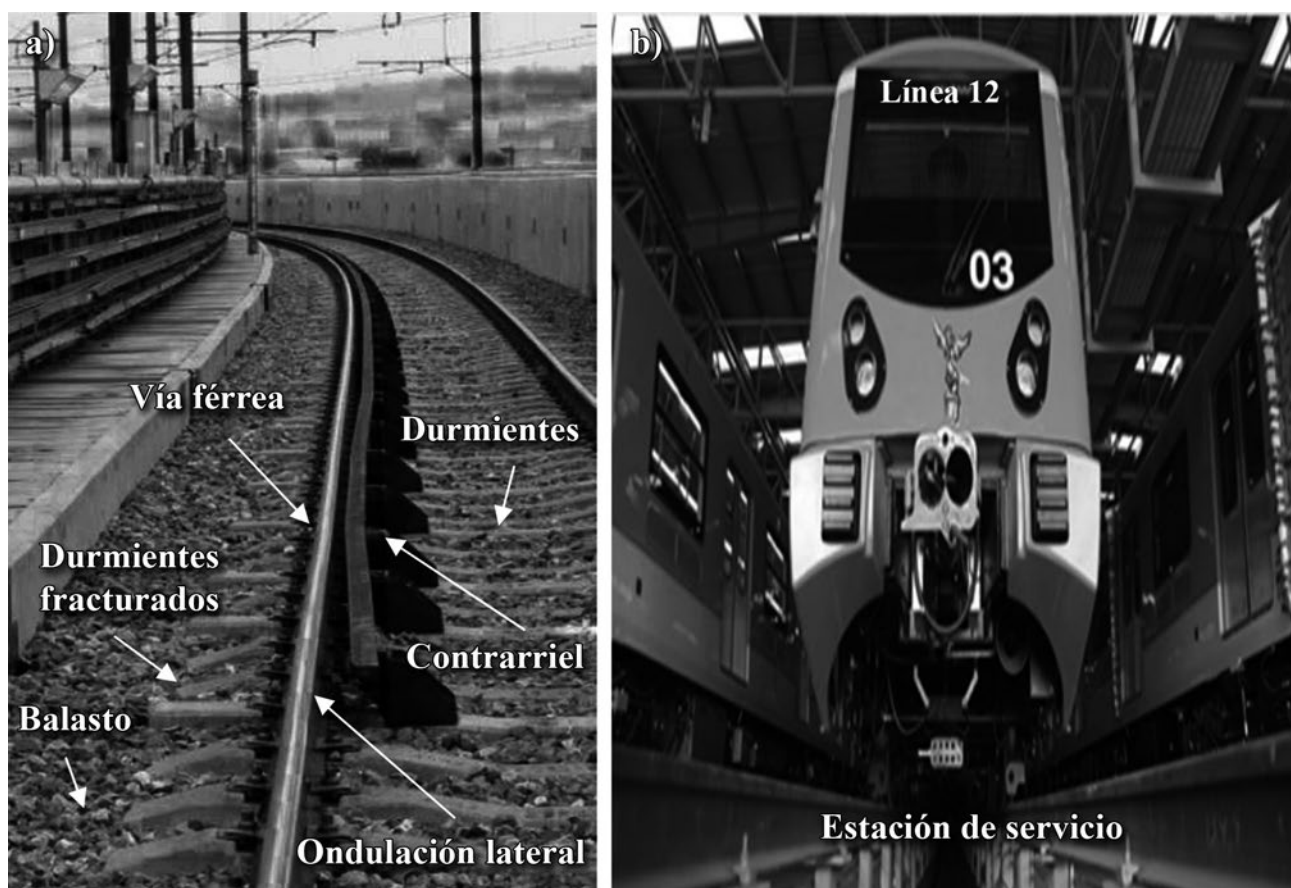
En la figura 3a) se muestra un durmiente agrietado en el centro a 16,848 kPa vía 1 y balasto que por efectos de vibración ha sido demolido cambiando su granulometría. La figura 3b) muestra un riel con huellas de desgaste por corrugación.

En la figura 4a) se muestra una fijación Nabla agrietada de 8,250 kPa después de que ha sido utilizada en la Línea 12 del metro. En la figura 4b) se presenta un riel con desgaste ondulatorio sometido a sobrecargas de 11,780 Kpa.

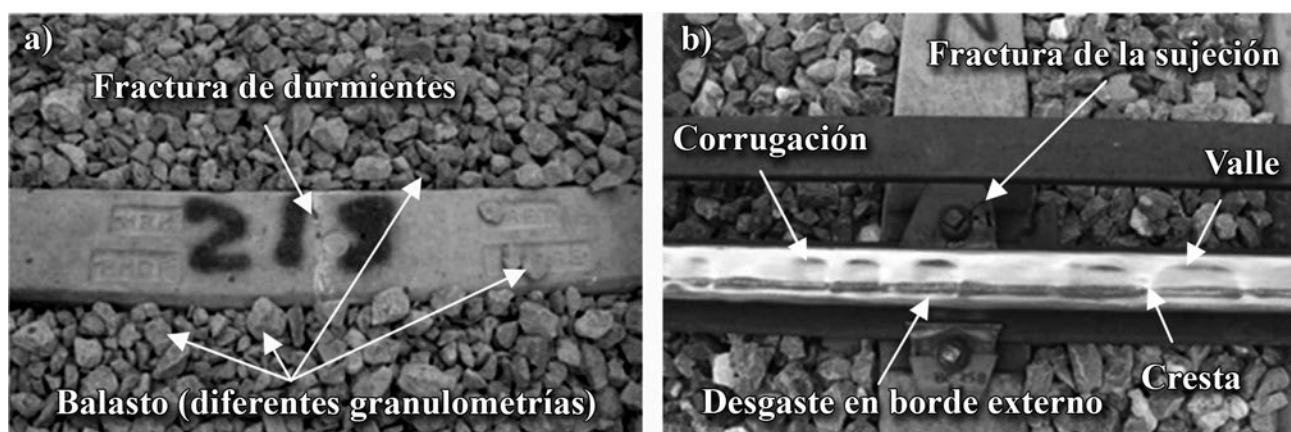
La Figura 5a) representa una micrografía a 2000X de la huella de contacto corrugada donde se pueden observar agrietamientos y deformación plástica del material de la vía de la Línea 12. La figura 5b) muestra un eje del vagón con ruedas metálicas donde puede apreciarse que han sido reperfiladas las caras de las ruedas para retirar el desgaste por abrasión generado a la tracción, frenado y rodadura con las pistas metálicas.

## 3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la figura 6a) el contacto (creepage) entre la rueda y el riel (Vignole-type) es de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>, [62, 63]. En secciones rectas la parte central de



**Figura 2.** Línea 12 del STCM; a) Contrarriel de la curva 27 vía 2, b) Convoy en la estación de servicio.

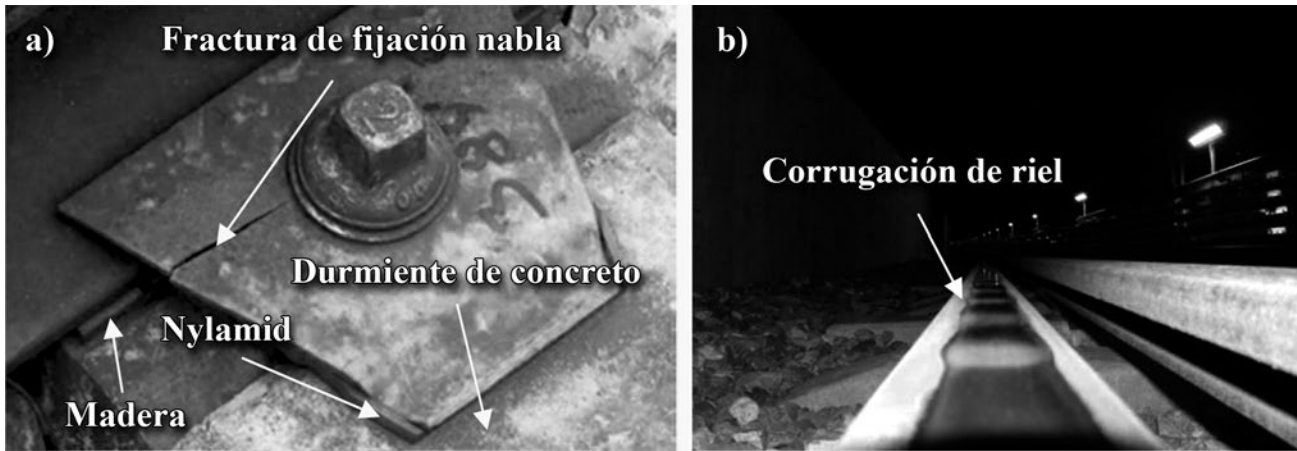


**Figura 3.** Fallas en línea 12 del STCM a) Durmiente agrietado en el centro a 16,848 kPa vía 1, b) Riel con huellas de desgaste por corrugación.

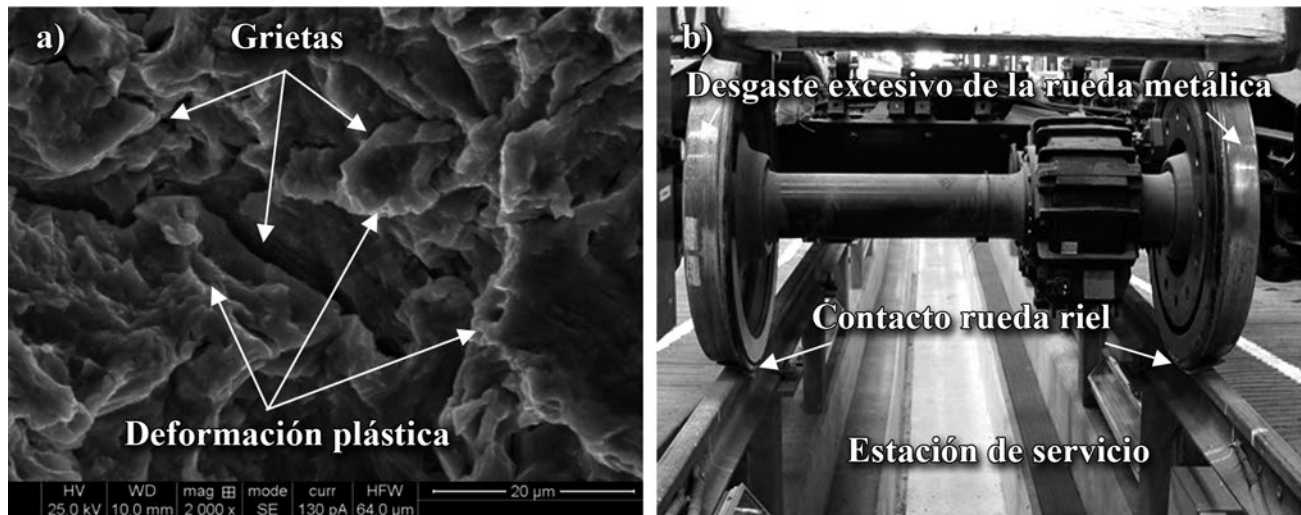
la rueda toma contacto con el riel, pero en curvas la parte interna de la rueda toma contacto con la esquina del riel [64, 65].

La carga es transmitida al riel a través del contacto (creepage) genera esfuerzos como resultado de la deformación del riel sobre los durmientes. El doblado de la cabeza del riel origina esfuerzos producto de efectos térmicos, deformación plástica residual una

vez que han sido removidas las cargas externas en el contacto rueda-riel [66, 67]. El contacto rueda - riel son fuente de diversos fenómenos como: fatiga por contacto de rodadura (RCF), desgaste, propagación de grietas, pérdida de adhesión, aislamiento del contacto y la influencia de los contaminantes que pudieran poner en riesgo el desempeño del Sistema Ferroviario durante cada recorrido [68, 69].



**Figura 4.** Fallas en línea 12 del STCM a) Fijación Nabla agrietada de 8,250 kPa, b) Desgaste ondulatorio con sobrecargas de 11,780 Kpa.



**Figura 5.** Fallas en línea 12 del STCM. a) Micrografía a 2000X de la huellas de desgaste por corrugación, b) Desgaste abrasivo de la rueda metálica.

En la figura 6b) son mostradas la existencia de tres posibles regiones de contacto entre la rueda y el riel. Las tasas de desgaste pueden variar debido a los niveles de fuerza y deslizamiento en cada región [70].

1. La región A. Es el contacto entre la parte central de la zona alta del riel y la parte central de la rueda. EL contacto normalmente ocurre en esta región cuando el vehículo toma curvas no muy pronunciadas o cuando este va en línea recta. El nivel de esfuerzos, la fuerza, el nivel de deslizamiento lateral y longitudinal son bajos.

2. En la región B. El contacto ocurre entre la esquina del riel y la esquina interna de la rueda. La zona de contacto en la región es muy pequeña comparada con la región A y en muchas ocasiones el contacto es severo. En esta región se generan altas tasas de desgaste, así como altos niveles de esfuerzo. En algunas ocasiones las dos regiones de contacto, A y B pueden

hacer contacto simultáneamente propiciando desgaste por corrugación.

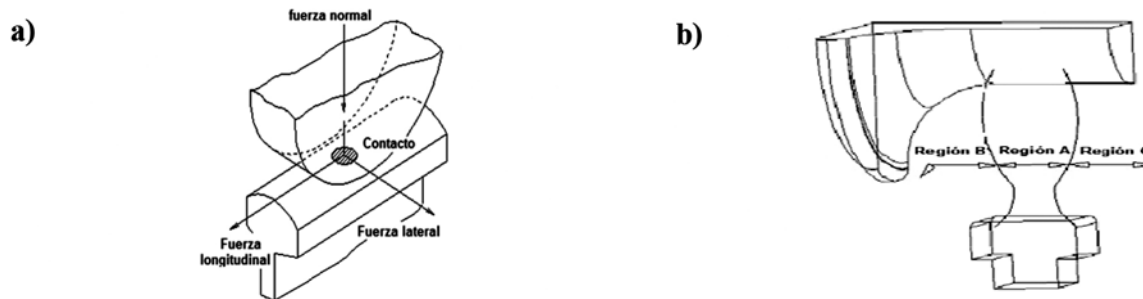
3. En la región C. El contacto ocurre entre la parte interna de la rueda y el riel aunque este es menos probable que suceda, un alto esfuerzo es generado produciendo un deficiente direccionamiento del vehículo.

Típicamente el esfuerzo en un contacto rueda riel es de alrededor de 3,000 MPa entre la esquina del riel y la parte interna de la rueda en las regiones A y B. El área de contacto decrece lo que origina un incremento de la presión de contacto formando agrietamiento y deformación plástica.

El esfuerzo en el contacto entre la parte central de la rueda y la región central de la parte alta del riel es de 1,300 MPa a 1,700 MPa región A y C.

En el contacto rueda riel existen dos zonas principales, donde el desgaste puede estar presente. La





**Figura 6.** Contacto metal – metal; a) Fuerzas que actúan en el contacto rueda riel (Sinclair, 2004) b) Zonas de contacto en una rueda y riel (Tourney, 2001).

primera es en la parte alta de riel y la parte central de la rueda (Top of the rail-wheel tread contact). La segunda es entre la esquina del riel y la parte interna de la rueda (Gauge face-wheel flange), principalmente en curvas. En consecuencia el porcentaje relativo de deslizamiento (slipage) y esfuerzo depende de los parámetros dinámicos de la interacción de la rueda y riel.

Las partículas desprendidas, producto del desgaste, son desprendidas de la superficie y mezcladas con contaminantes presentes en el medio, originando la composición de un tercer cuerpo sobre la parte alta del riel propiciando desgaste abrasivo.

Los defectos importantes sobre las pistas metálicas son:

- Los rieles: desgaste ondulatorio, desgaste lateral, desgaste vertical, aplastamiento, deformación por fluencia del metal, fisuras, desnivelaciones de la superficie de rodadura.
- Las soldaduras aluminotérmicas: defectos de geometría, hoyos en la superficie.
- Los durmientes: rotura, fisuras y grietas, desgaste anormal del concreto.
- Las fijación del riel: apriete excesivo, aflojamiento, rotura.
- Las fijaciones del contrarriel: aflojamiento, rotura, uso indebido de materiales para asegurarlos al durmiente.
- El balasto: contaminación por elementos finos, crecimiento de lodo, friabilidad y desgaste prematuro, uso de elementos calcáreos, granulometría demasiado pequeña.
- La geometría de la vía: defectos de nivelación, defectos de alineación de la vía.

Las fallas están ubicados en las curvas cuanto más pequeño es el radio, más grande es el número y la gravedad de estas.

Imperfecciones en las curvas:

- La mayoría tiene un radio de curva menor de la especificada.
- En todas se encontró desgaste ondulatorio.
- Problemas de las rodaduras sobre las soldaduras.
- Problemas de soldadura sobre las juntas.
- Uso de contrarrieles no especificados.
- Fijaciones rotas.
- Durmientes agrietados o incluso rotos.
- Rodadura diferente en las filas izquierda y derecha.
- Balasto contaminado con arena.
- Nivelación no uniforme en los durmientes.
- Deformación plástica en rieles.
- Contrarrieles sin protección óptima.

#### 4 CONCLUSIONES

Las fallas de la línea 12 del metro de la Ciudad de México fueron causadas por muchos aspectos, entre ellos los más relevantes son: mala planeación, restricciones de trazos por la coincidencia con zonas habitacionales y zonas protegidas INAH, modificaciones a las rutas de trazadas incluyendo infraestructura de zonas elevadas y a nivel de piso, ampliación del proyecto de manera prematura, entrega apresurada del proyecto, certificaciones deficientes, uso de materiales defectuosos, mantenimientos postergados, mala distribución de recursos debido a la mala planeación, aplicaciones de ingeniería inadecuadas, mala toma de decisiones, temor al caos por la paralización parcial de la red del STC Metro y radios de curvatura menores a los requeridos de 350 m por el fabricante lo que originó fallas en cascada.

Los trenes y las vías con re-perfilados, están en operación con los ejes con valores por debajo de la tolerancia de mantenimiento. Especialmente con el coeficiente residual de 3,6 mm, mientras que el valor mínimo tolerado en servicio es de 6,5 mm. El riesgo determinado por los valores del coeficiente residual

es muy pequeño, pues la posibilidad de un descarrilamiento es del 55%.

El desgaste ondulatorio en las vías de la Línea 12 del Metro se podrá controlar con acciones correctivas pero permanecerá en ellas “de por vida”, coincidiendo con lo reportado por la empresa Systra.

Las medidas correctivas para “disminuir los esfuerzos” que el tren provoca en las vías, particularmente en las curvas que tienen menos de 350 metros de radio, no cumplen con las condiciones de funcionamiento y la única forma de corregir el problema de raíz es demoliendo la infraestructura en las curvas y volverlas a construir con las especificaciones adecuadas aunque esto pueda afectar principalmente viviendas, construcciones protegidas por el INAH y vialidades e infraestructura urbana.

La decisión del Gobierno fue dar un mantenimiento mayor que permita hacer funcional la obra de la Línea 12 del Metro, aunque los problemas prevalezcan y con mantenimientos correctivos programados para hacerla funcional, de lo contrario la inversión de la obra correctiva de raíz podría ser una inversión que superaría lo invertido en esta magna obra.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sistema de Transporte Colectivo Metro, al Instituto Politécnico Nacional, a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a los alumnos de Facultad de Ingeniería: G. Vázquez López, A. Morales Herrera, A. Hernández Peña, E. Mijangos Quiroz, por el apoyo brindado en el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Proyecto metro. (2014). Llega el primer tren de la línea dorada a talleres tlahuac. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proyectometro.df.gob.mx/comunicacion-social/boletines-informativos/llega-el-primer-tren-de-la-linea-dorada-a-talleres-tlahuac>
- [2] Ciudadanos en red. (2014). Prueban trenes línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://ciudadanosenred.com.mx/metroaldia/prueban-trenes-linea-12>
- [3] Proceso. (2014). Difunden libro anónimo con “la verdad de la Línea 12 del Metro”. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=378043>

- [4] Milenio. (2014). La verdad de la línea 12 del metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de [http://www.milenio.com/df/linea\\_12\\_del\\_Metro-Linea\\_Dorada-L12\\_MILFIL20140611\\_0001.pdf](http://www.milenio.com/df/linea_12_del_Metro-Linea_Dorada-L12_MILFIL20140611_0001.pdf)
- [5] Bolaños, A. y Quintero J. (2007). Presentó Ebrard el proyecto de la línea 12 del Metro, que irá de Tláhuac a Mixcoac. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.jornada.unam.mx/2007/08/09/index.php?section=capital&article=036n1cap>
- [6] Consejería Jurídica y de Servicios Legales del Distrito Federal. (2007). Licitación Pública Internacional (Convocatoria No. 024). recuperada el 24 de octubre de 2014, de [http://www.consejeria.df.gob.mx/uploads/gacetas/Octubre07\\_8\\_186.pdf](http://www.consejeria.df.gob.mx/uploads/gacetas/Octubre07_8_186.pdf)
- [7] Consejería Jurídica y de Servicios Legales del Distrito Federal. (2008). Licitación Pública Internacional (Convocatoria No. 001). Recuperado el 24 de octubre de 2014, de [http://www.consejeria.df.gob.mx/uploads/gacetas/Enero08\\_%2021\\_257.pdf](http://www.consejeria.df.gob.mx/uploads/gacetas/Enero08_%2021_257.pdf)
- [8] Bolaños. Sánchez. A. (2008). Lanza mañana GDF convocatoria de licitación para la Línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014.
- [9] Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2014). Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.metro.df.gob.mx/>
- [10] Canseco. F. (2008). Modifican ruta de Línea 12 por presiones de vecinos. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.milenio.com/buscador/?text=Modifican+ruta+de+L%C3%ADnea+12+por+presiones+de++vecinos>
- [11] Castillo. M. (2008). Cancelan 2 estaciones de la línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.milenio.com/buscador/?text=Cancelan+2+estaciones+de+la+L%C3%ADnea+12>
- [12] Castillejos. J. (2008). Línea 12 arranca construcción a vapor. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de [http://web.archive.org/web/20081209084823/http://www.exonline.com.mx/diario/noticia/comunidad/pulsocapitalino/linea\\_12\\_arranca\\_construccion\\_a\\_vapor/358194](http://web.archive.org/web/20081209084823/http://www.exonline.com.mx/diario/noticia/comunidad/pulsocapitalino/linea_12_arranca_construccion_a_vapor/358194)
- [13] Canseco. F. (2008). El GDF quiso nombrar Francisco Villa una estación del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.milenio.com/buscador/?text=El+GDF+quiso+nombrar+Francisco+Villa+una++estaci%C3%B3n+del+Metro>
- [14] Pantoja. S. (2008). Comprará Metro predios para construcción de Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.eluniversal.com.mx/notas/540648.html>

- [15] Valdéz. I. (2008). Cambian nombre a 2 paradas de Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.reforma.com/libre/acceso/acceso.htm?urlredirect=/ciudad/articulo/924362/>
- [16] Gómez. Flores. L. (2009). Razones técnicas, económicas y sociales obligan a cambiar proyecto de línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.jornada.unam.mx/2009/04/08/index.php?section=capital&article=031n1cap>
- [17] Grajeda. E. (2009). ALDF aprueba suspensión de la línea 12, por modificaciones. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/94780.html>
- [18] Notimex. (2012). Línea 12 del Metro inicia recorridos de familiarización. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://noticierostelevisa.esmas.com/df/457898/linea-12-del-metro-inicia-recorridos-familiarizacion/>
- [19] El universal. (2012). FCH: Línea 12, esfuerzo de voluntades; recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.eluniversal.com.mx/notas/879793.html>
- [20] Proceso. (2014). Inhabilitan 20 años a Horcasitas por fallas en la línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=381691>
- [21] Lozada. A. M. y González. A. (2013). Anuncia Miguel Ángel Mancera ampliación de Línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.oem.com.mx/elsoldemexico/notas/n2914139.htm>
- [22] Pazos F. (2013). Cerrarán cuatro estaciones de Línea 12 del Metro por mantenimiento. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2013/07/25/910579>
- [23] Azteca noticias. (2013). Línea 12 del Metro recortará horarios por mantenimiento. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.aztecanoticias.com.mx/notas/sociedad-y-medio-ambiente/162423/linea-12-del-metro-recortara-horarios-por-mantenimiento>
- [24] Notimex. (2013). Línea 12 del Metro inicia cierre de estaciones por mantenimiento. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2013/10/04/921868>
- [25] Excelsior. (2014). Línea 12 del Metro presentará retrasos por mantenimiento. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/02/18/944369>
- [26] Gómez. Flores. L. (2014). Disminuirá velocidad de trenes en línea 12 por trabajos de renovación. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/02/17/disminuira-velocidad-de-trenes-en-linea-12-por-trabajos-de-renovacion-5031.html>
- [27] Gómez. Flores L. (2014). Por fallas, fuera de servicio la mitad de la línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/03/11/suspenden-servicio-en-tramo-elevado-de-linea-12-del-metro-5599.html>
- [28] Duran. M. (2014). Tramo de Línea 12 del Metro será suspendido por fallas. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://noticias.terra.com.mx/mexico/df/tramo-de-linea-12-del-metro-sera-suspendida-por-fallas,c7d06cf2222b4410VgnVCM10000098cceb0aRCRD.html>
- [29] Torres. M. (2014). El catálogo de fallas de la Línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://noticieros.televisa.com/programas-noticiero-con-joaquin-lopez-doriga/1403/catalogo-fallas-linea-12-metro/>
- [30] de la Rosa. Y. (2014). Fallas en L12 por mal diseño en construcción y calidad de vías. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.razon.com.mx/spip.php?article208929>
- [31] Boites. J, Ramírez. F, López. S. (2014). Anomalías en tramo elevado de la Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de [http://fotos.eluniversal.com.mx/coleccion/muestra\\_fotogaleria.html?idgal=17642](http://fotos.eluniversal.com.mx/coleccion/muestra_fotogaleria.html?idgal=17642)
- [32] Ramírez. K. (2014). Lista la Comisión Investigadora de la Línea 12 en la ALDF. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/03/18/949341>
- [33] Pérez. Courtade. L, Pazos. F. (2014). Mancera cesa a Horcasitas; caso Línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/03/20/949508>
- [34] Bolaños. Sánchez. Á. (2014). Cita ALDF a comparecer a Enrique Horcasitas por fallas en Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/03/19/cita-aldf-a-comparecer-a-enrique-horcasitas-por-fallas-en-linea-12-9198.html>
- [35] Excelsior. (2014). Línea 12 del Metro tiene falla sistémica: Joel Ortega. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/03/21/949905>
- [36] Teresa. Ramírez. B. (2014). Bojórquez defiende la línea 12: “rueda y riel son compatibles”. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.jornada.unam.mx/2014/03/25/capital/029n1cap>
- [37] CNN Expansión. (2014). Consorcio sugiere cambios en Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.cnnexpansion.com/negocios/2014/03/31/ica-carso-alstom-reparacion-linea-12>

- [38] López. J. (2014). Presentan asesores técnicos para L-12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?id=200171&v=5&urlredirect=http://www.reforma.com/aplicaciones/articulo/default.aspx?id=200171&v=5>
- [39] Excelsior Especiales. (2014). STC recibe primera evaluación de fallas en Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de [http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/03/18/949266#cxrecs\\_s](http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/03/18/949266#cxrecs_s)
- [40] Robles. J. (2014). Contraloría inspecciona y toma muestras en la L12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2014/contraloria-inspecciona-y-toma-muestras-de-l12-998763.html>
- [41] Maza. Z. (2014). Realizan inspección en Línea 12 bajo notario. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.aztecanoticias.com.mx/notas/mexico/186653/realizan-inspeccion-en-linea-12-bajo-notario>
- [42] Grupo Formula. (2014). Firma francesa ETF se retira de diagnóstico Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.radioformula.com.mx/notas.asp?Idn=400259#sthash.M7CyuzC9.dpuf>
- [43] Ramos. R. (2014). Crean comisiones para Oceanografía y L12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://eleconomista.com.mx/sociedad/2014/04/09/crean-comisiones-oceanografia-l12>
- [44] Excelsior Especiales. (2014). Comparece Joel Ortega en San Lázaro por Línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/04/08/952947>
- [45] Aristegui Noticias. (2014). Fallas en operación y diseño en Línea 12 del Metro, concluye informe. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://aristeguinoticias.com/0509/mexico/fallas-en-operacion-y-diseno-en-linea-12-del-metro-concluye-informe/>
- [46] CNN México. (2014). La Línea 12 del Metro, con fallas en operación, diseño y mantenimiento. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://mexico.cnn.com/nacional/2014/09/04/la-linea-12-del-metro-con-fallas-en-operacion-diseno-y-mantenimiento>
- [47] CNN Expansión. (2014). La Línea 12 tuvo fallas en diseño, operación y mantenimiento. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.cnnexpansion.com/economia/2014/09/05/la-linea-12-tuvo-fallas-en-diseno-y-operacion-systra>
- [48] Diario de México. (2014). ‘Rompecabezas’ De 312 Mil Piezas En Reparación De L12 Del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.diariodemexico.com.mx/rompecabezas-de-312-mil-piezas-en-reparacion-de-l12-del-metro/>
- [49] Pantoja. S. (2014). Gobiernos de Ebrard y Mancera, responsables de fallas en Línea 12: Systra. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=381359>
- [50] Proceso. (2014). Cierre parcial de la Línea Dorada, un capítulo más de los desencuentros Mancera-Ebrard. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=366964>
- [51] Proceso. (2014). ICA-Carso-Alstom culpa al GDF de anomalías en la Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=367586>
- [52] Proceso. (2014). Línea 12 “enferma de por vida”: persistirá desgaste ondulatorio en vías. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=383578>
- [53] Proceso. (2014). Mancera deslinda a Ebrard de corrupción en la Línea 12 del Metro. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=382455>
- [54] Pantoja. S. (2014). Línea 12 vienen sanciones... pero los “grandes” se salvan. *Proceso*, vol. 27(1966), 32-34.
- [55] Monge. R. (2014). La Línea Dorada: vicios, defectos, desperfectos e irresponsabilidad. *Proceso*, vol. 12(1950), 31-33.
- [56] Monge. R. (2014). El destituido Horcasita balconea al director del metro. *Proceso*, vol. 12(1951), 31-33.
- [57] Proceso. (2014). Exfuncionarios del Metro, en lista negra de investigados por Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=378829>
- [58] Proceso. (2014). Destinará GDF 500 mdp para rehabilitar la Línea 12. Recuperado el 24 de octubre de 2014, de <http://www.proceso.com.mx/?p=384668>
- [59] P. A. Belleste, P. A. Meehan, W.J.T. Daniel, Validation of a tangent track corrugation model with a two disk test rig, *Wear* 271 (2011) 268-271.
- [60] O. Oyarzabal, J. Gómez, J. Santamaría, E. G. Vadillo, Dynamic optimization of track components to minimize rail corrugation, *Journal of sound and vibration* 319 (2009) 904-917.
- [61] Donald T., Eadie, Marco Santoro, Kevin Oldknow, Yasushi Oka; Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves, *Wear* 265 (2008) 1212-1221.

- [62] S. L. Grassie, J Kalousek; "Rail corrugation: characteristics, causes and treatments", published in the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (ISSN 0954-4097), 1993, Vol. 207, No. F1 pp. 57-68, DOI 10.1243/PIME~PROC~1993~207, Woodhead publishing retrieved.
- [63] B. Kurzeck; Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation, *Wear* 271 (2011) 299–310.
- [64] Stuart L. Grassie, John W. Edwards; Development of corrugation as a result of varying normal load, *Wear* 265 (2008) 1150–1155.
- [65] O. Oyarzabal, Gómez, J. Santamaría, E. G. Vadillo; Dynamic optimization of track components to minimize rail corrugation, *Journal of Sound and Vibration* 319 (2009) 904–917.
- [66] S. Descartes, A. Saulot, C. Godeau, S. Bondeux, C. Dayot, Y. Berthier; Wheel flange/rail gauge corner contact lubrication: Tribological investigations; *Wear* 271 (2011) 54–61.
- [67] A. Saulot, S. Descartes, Y. Berthier; Sharp curved track corrugation: From corrugation observed on-site, to corrugation reproduced on simulators; *Tribology International* 42 (2009) 1691–1705.
- [68] Xuesong Jin, Xinbiao Xiao, Zefeng Wen, Zhongrong Zhou; Effect of sleeper pitch on rail corrugation at a tangent track in vehicle hunting; *Wear* 265 (2008) 1163–1175.
- [69] Donald T. Eadie, Dave Elvidge, Kevin Oldknow, Richard Stock, Peter Pointner, Joe Kalousek, Peter Klauser; The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling; *Wear* 265 (2008) 1222–1230.
- [70] Anders Johansson, Jens C.O. Nielsen; Rail corrugation growth—Influence of powered wheelsets with wheel tread irregularities; *Wear* 262 (2007) 1296–1307.

**¿Le interesa un espacio en nuestra revista?**

# Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

## CONTÁCTENOS

 [posgrado.fi.buap@gmail.com](mailto:posgrado.fi.buap@gmail.com)

 <http://investigacionyposgradofi.blogspot.mx>

 [facebook.com/posgrado.ingenieria.buap](https://www.facebook.com/posgrado.ingenieria.buap)

 @POSGRADO\_FI

## ACREDITACIONES

Nuestro programa de la Licenciatura en Ingeniería Civil cuenta con reconocimiento vigente del Consejo para la Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), organismo reconocido por COPAES para la evaluación de programas de Ingeniería.

**CACEI**

EL CONSEJO DE ACREDITACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA A.C.  
RECONOCIDO POR EL CONSEJO PARA LA ACREDITACIÓN DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, A.C.

**ACREDITA**

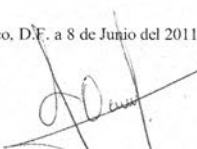
*AL PROGRAMA DE*

*INGENIERÍA TEXTIL*

*DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA*

DEL DÍA 8 DE JUNIO DEL 2011 AL 7 DE JUNIO DEL 2016 POR CUMPLIR  
CON LOS REQUISITOS DE CALIDAD EDUCATIVA ESTABLECIDOS POR  
EL CACEI.

México, D.F., a 8 de Junio del 2011

  
Ing. Fernando Ocampo Canabal  
Presidente del Consejo Directivo

ACTA No. 1164



# La xilema del *Helianthus annuus* L. como sustituto del poliestireno expandido en sistemas de embalaje

Israel Rodríguez Mora

## RESUMEN

Debido a la imperante necesidad de sustituir materiales derivados del petróleo por materiales renovables y biodegradables, se analizaron las propiedades físicas de la xilema de *Helianthus annuus* L. para en primera instancia sustituir al poliestireno expandido en sistemas de embalaje. Se presentan los resultados al comparar las principales características de los sistemas de embalaje. La densidad de la xilema fue un 80% mayor a la del poliestireno. En la degradación por UV la xilema mostró una degradación visible mientras que el poliestireno no sufrió cambios apreciables. Las dimensiones de la xilema permanecieron sin cambios a 110°C en cambio el poliestireno se degradó por completo. En la prueba de humedad el poliestireno no absorbió agua ni vapor, mientras que la xilema aumentó su masa en un 50% con el agua y 30% con vapor. Los resultados favorecen la sustitución del poliestireno por la xilema debido a ser un material completamente biodegradable y a que el aumento de costos puede ser absorbido por el consumidor.

**Palabras Clave:** Materiales biodegradables, embalaje, poliestireno.

## ABSTRACT

Due to the urgent need to replace petroleum-based materials from renewable and biodegradable materials, the physical properties of the xylem of *Helianthus annuus* L. were analyzed. In the first instance to replace polystyrene foam packaging systems. Were compared the results to the main features of the present packaging systems. Xylem density was 80% higher than the polystyrene. UV degradation in the xylem showed visible degradation while polystyrene underwent no appreciable changes. The dimensions of the xylem remained unchanged at 110°C whereas the polystyrene was completely degraded. Polystyrene in water test not absorb moisture or water vapor while the xylem increase its mass by 50% in water and 30% in steam. The results allow for the replacement of polystyrene with the xylem due to being a fully biodegradable material, because the increased costs could be absorbed by the consumer.

**Keywords:** Biodegradable materials, packaging systems, polystyrene.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años el excesivo uso e inadecuado manejo de los desechos del poliestireno expandido, y la

dependencia de este mismo para embalaje de diversos productos perjudica la naturaleza, debido al alto impacto ecológico que tiene este producto desde su proceso de fabricación y la más dañina, cuando una vez usado, es desechado de vuelta a la naturaleza. Por los cambios que ha sufrido no puede volver a integrarse y de acuerdo a los mismos estudios realizados por los ecologistas, este producto tarda 100 años en degradarse. En este tiempo el entorno donde se deposita se ve muy afectado, tanto los animales como la misma tierra y el aire, debido a los gases que se liberan cuando este se expone al sol.

Recibido 16 de julio, 2014; aceptado 28 de agosto, 2014

Israel RODRÍGUEZ MORA  
correo electrónico: israel\_rodriguez@hotmail.com

Instituto Tecnológico de Puebla  
Av. Tecnológico núm. 420 Col. Maravillas, C.P. 72220, México-Puebla, Pue.

Este trabajo propone una idea para sustituir al poliestireno expandido en sistemas de embalaje, por la xilema del *Helianthus annuus* L. (1). A pesar de ser considerada una planta indeseable (2), es un material que tiene propiedades biodegradables y una vez usado puede ser desechado sin perjudicar a la naturaleza, En este trabajo se realizan una serie de pruebas para determinar si la xilema del *Helianthus annuus* L. es un posible sustituto del poliestireno expandido en sistema de embalaje.

## 2 CARACTERÍSTICAS

### *Xilema*

Se trata de un tejido leñoso que conduce agua y sales inorgánicas en forma ascendente por toda la planta y proporciona también soporte mecánico. En las hojas, las flores y los tallos jóvenes, el xilema se presenta combinado con floema en forma de haces vasculares conductores. Las raíces tienen un cilindro central de xilema. El xilema formado a partir de los puntos de crecimiento de tallos y raíces se llama primario. Pero además, la división de las células del cámbium, situado entre el xilema y el floema, puede producir nuevo xilema o xilema secundario; esta división da lugar a nuevas células de xilema hacia el interior en las raíces y hacia el exterior en casi todos los tallos. Algunas plantas tienen muy poco xilema secundario o ninguno, en contraste con las especies leñosas; el término botánico xilema significa madera.

## 3 RESULTADOS

### *Densidad*

Las masas se obtuvieron mediante una balanza electrónica marca EKS electronics con precisión de 0.01 gr, las dimensiones geométricas se obtuvieron con un vernier marca Mitutoyo con precisión de 0.05 mm. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos, como se puede observar la densidad de la xilema del *Helianthus annuus* L. es mayor que la densidad del poliestireno expandido.

**Tabla 1.** Densidades de poliestireno expandido y xilema de *Helianthus annuus* L.

	Peso	Volumen	Densidad
<b>Poliestireno</b>	0.045g	4.5 cm <sup>3</sup>	0.01 g/cm <sup>3</sup>
<b>Xilema</b>	0.060g.	3.322 cm <sup>3</sup>	0.018g/cm <sup>3</sup>

### *Absorción de agua*

La prueba de absorción se realizó tomando dos muestras por material, al igual que en la prueba anterior cada

muestra tenía las mismas características. En el caso del poliestireno con un peso de 0.045 gr. y un volumen de 4.5 cm<sup>3</sup>, en la muestra del xilema con un peso de 0.060 gr. y un volumen de 3.322 cm<sup>3</sup>. En el primer experimento, se colocó una muestra de poliestireno y una de polocote en un recipiente con agua destilada, a temperatura ambiente por una hora (tabla 2).

**Tabla 2.** Pesos de poliestireno expandido y xilema de *Helianthus annuus* L. después de absorción de agua.

	Peso Inicial	Peso Final
<b>Poliestireno</b>	0.046 g.	0.04559g
<b>Xilema</b>	0.060 g.	0.090g

### *Absorción de vapor de agua*

El objetivo de esta prueba es comparar la absorción de agua a través del vapor en estos materiales.

El proceso consistió en emplear dos muestras una poliestireno expandido de 4.5 cm<sup>3</sup> de volumen con un peso 0.045 gramos y otra de xilema de *Helianthus annuus* L. con un volumen de 3.322 cm<sup>3</sup> y un peso de 0.060 gr. Se pusieron al mismo tiempo en un recipiente que contenía agua destilada a una temperatura de 100 °C por un periodo de 15 minutos para ver su resistencia frente al vapor de agua. En dicha prueba se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3.** Pesos de poliestireno expandido y xilema de *Helianthus annuus* L. después de absorción de vapor.

	Peso Inicial	Peso Final
<b>Poliestireno</b>	0.045 g.	0.045g
<b>Xilema</b>	0.060 g.	0.085g

### *Estabilidad térmica*

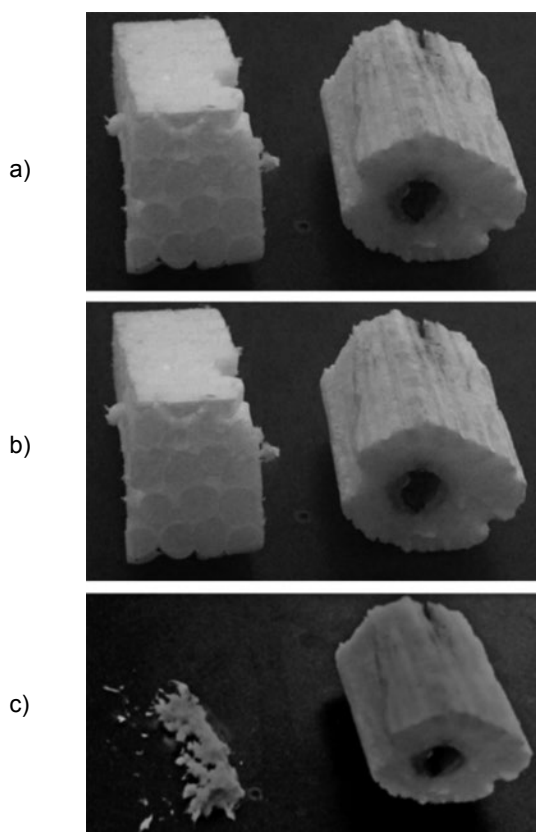
Se colocaron las muestras en una parrilla de calentamiento a 120 °C, tomándose fotografías al inicio de la prueba, después de 15 minutos y después de 30 minutos.

Se observó que la muestra de poliestireno comenzó a sufrir deformaciones después de 10 minutos de iniciada la prueba, en contraste la muestra de xilema se mantuvo estable (figura 1b), una vez transcurrida media hora se pudo observar una degradación casi total de la muestra de poliestireno, al contrario de la de xilema que se mantuvo sin cambios evidentes (figura 1c).

### *Degradación por UV*

La prueba se realizó empleando una cámara con cuatro lámparas de 9 watts de luz ultravioleta con una





**Figura 1.** Muestras de poliestireno (izquierda) y xilema (derecha) a) inicio de prueba. b) 15 minutos y c) 30 minutos a 120 °C.

longitud de onda de 350 nm, sometiendo las muestras a esta exposición durante cuatro horas.

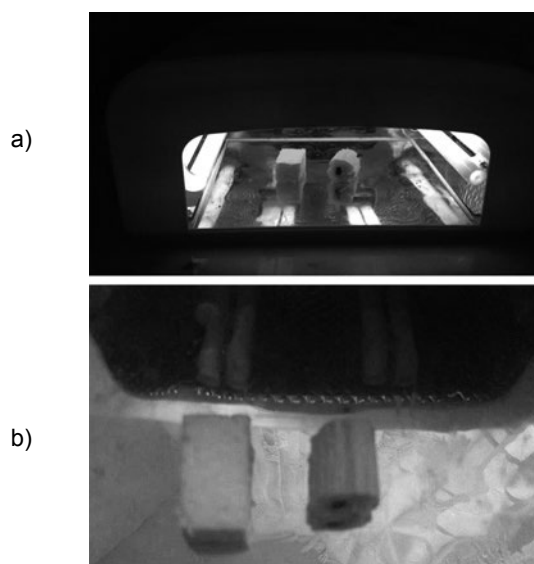
Una vez concluida la prueba se observó que la muestra de poliestireno no presentaba ningún cambio de aspecto físico. La muestra de xilema presentó un cambio de coloración en la parte superficial, así como una disminución en su flexibilidad en su capa externa (figura 2).

#### 4 CONCLUSIONES

De la prueba de densidad realizada la xilema de *Helianthus annuus* L. resultó más densa que el poliestireno expandido en un 80%.

En la prueba frente al agua el poliestireno expandido no se vio afectado mientras que la xilema *Helianthus annuus* L. absorbió el 50% de su peso en agua.

En la prueba frente a vapor de agua la muestra de el poliestireno expandido no se vio afectado ni absorbió agua mientras que la muestra de xilema de *Helianthus annuus* L. absorbió un 30% de su peso.



**Figura 2.** Muestras de poliestireno (izquierda) y xilema (derecha) a) inicio de prueba. b) 4 horas sometidas a luz ultravioleta.

En la prueba de estabilidad dimensional frente a factores térmicos la muestra de poliestireno expandido no resistió 120 °C mientras que la de xilema de *Helianthus annuus* L soportó la temperatura en un periodo de 30 minutos sin mostrar ninguna deformación.

En la prueba realizada frente a luz ultravioleta el poliestireno expandido no se vio afectado en su estructura física mientras que la xilema del *Helianthus annuus* L. empieza perder partes de su capa exterior desquebrajándose.

En conclusión se puede afirmar que la xilema *Helianthus annuus* L. es un buen sustituto del poliestireno expandido en sistemas de embalaje debido a su baja densidad y capacidad de soportar altas temperaturas manteniendo su estabilidad geométrica, y aportando la ventaja de ser amigable con el medio ambiente ya que es completamente biodegradable, lo que permite que una vez usado y desechado puede volver a la naturaleza sin afectar el medio ambiente inclusive sirviendo como abono.

#### REFERENCIAS

- [1] Asch DL (1993) Common sunflower (*Helianthus annuus* L.):the pathway to its domestication. Paper delivered at 58th annual meeting, Society for American Archaeology, St. Louis, 17 May 1993.
- [2] Abernathy, J.R., D. Hollingsworth, and J.W. Keeling. 1977. Control of volunteer sunflower in rotational crops. Progress Report, No. PR-3438, Texas Agricultural Experiment Station. 3 pp. 2.

## ACREDITACIONES

Nuestro programa de la Licenciatura en Ingeniería Civil cuenta con reconocimiento vigente del Consejo para la Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI), organismo reconocido por COPAES para la evaluación de programas de Ingeniería.

**CACEI**

EL CONSEJO DE ACREDITACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA A.C.  
RECONOCIDO POR EL CONSEJO PARA LA ACREDITACIÓN DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, A.C.

**ACREDITA**

*AL PROGRAMA DE*

*INGENIERÍA GEOFÍSICA*

*DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
DE LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA*

DEL DÍA 8 DE JUNIO DEL 2011 AL 7 DE JUNIO DEL 2016 POR CUMPLIR  
CON LOS REQUISITOS DE CALIDAD EDUCATIVA ESTABLECIDOS POR  
EL CACEI.

México, D.F. a 8 de Junio del 2011

  
Ing. Fernando Ocampo Canabal  
Presidente del Consejo Directivo

ACTA No. 1163



# Análisis de esfuerzos en engranes rectos y su validación aplicando mecánica computacional (FEM)

Ana Cecilia Piñón Reyes, J. Flores Méndez

## RESUMEN

En una gran cantidad de máquinas existe la transmisión de movimiento de rotación de un eje a otro. Los sistemas de transmisión en la industria mediante engranes o ruedas dentadas, constituyen uno de los mejores medios para realizar este fin. Los engranajes son sistemas mecánicos que transmiten el movimiento de rotación desde un eje hasta otro mediante el contacto sucesivo de pequeñas levas denominadas dientes. Debido a esta importancia, el análisis de posibles fallas durante su operación toma gran relevancia para los diseñadores. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es desarrollar una propuesta para el análisis del esfuerzo de flexión en engranes rectos aplicando CAE (Ingeniería Asistida por Computadora). El proceso consiste en modelar un engrane recto con software de diseño (PLM-Siemens NX v8.5) y simular su comportamiento cuando es sometido a cargas de contacto (desgaste) y flexión, comparando los resultados con los obtenidos por medio de las normas de la American Gear Manufacturers Association (AGMA). Los resultados revelaron que el análisis con Ingeniería Asistida por Computadora presenta valores en promedio ligeramente más conservadores comparados con los métodos teóricos, concluyendo que la propuesta representa un nuevo complemento de diseño y otra alternativa para el análisis de engranes rectos.

**Palabras clave:** Engrane recto, esfuerzo de flexión, esfuerzo de contacto, AGMA.

## ABSTRACT

In a lot of machines exists transmission of rotary motion from one shaft to another. The transmission systems in the industry by gears or sprockets are one of the best means to achieve this objective. Gears are mechanical systems that transmit rotational movement from one shaft to another by successive contact of small cams called contact tooth. Due to this importance, the analysis of possible failures during the operation takes great relevance for designers. Therefore, the objective of this research is to develop a proposal for the analysis of bending stress in spur gears using CAE (Computer Aided Engineering). The process involves modeling a spur gear with design software (PLM-Siemens NX v8.5) and simulate their behavior when is subjected to loads of contact (wear) and flexion, comparing the results with those obtained using standards the American Gear Manufacturers Association (AGMA). The results revealed that the analysis with Computer Aided Engineering presents values averaged slightly more conservative compared to the theoretical methods, concluding that the proposal represents a new design complement and alternative for the analysis of spur gears.

**Keywords:** Straight Gear, bending stress, contact stress, AGMA.

Recibido: 20 de junio, 2014; aceptado 10 de agosto, 2014.

Ana Cecilia PIÑÓN REYES  
Correo electrónico: acpr\_2417@hotmail.com  
J. FLORES MÉNDEZ  
Correo electrónico: xavier\_snk@hotmail.com

Instituto Tecnológico de Puebla. Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica. Av. Tecnológico núm. 420 Col. Maravillas, CP 72220, México-Puebla, Pue.

## 1 INTRODUCCIÓN

Existen principalmente dos modos de falla que afectan a los dientes de un engrane: la fractura por fatiga debido a esfuerzos de flexión en la raíz y la fatiga superficial sobre la cara del mismo debido a los esfuerzos por contacto (esfuerzo de desgaste). Para el análisis de ambos problemas, existen métodos teóricos que facilitan sus cálculos y aseguran un buen diseño, destacando los presentados por las normas AGMA, los cuales brindan una metodología reconocida y aceptada internacionalmente, complementada con el uso de factores de corrección. Sin embargo, la selección de estos factores está condicionada al criterio y experiencia de diseñador, dando como resultado diseños útiles, pero en algunas ocasiones no muy conservadores. Por otra parte, el continuo avance de los sistemas computacionales ha permitido el desarrollo de software de diseño, cuyas poderosas plataformas de análisis con base en métodos numéricos han generado nuevas herramientas para estudiar y simular el comportamiento de sistemas mecánicos en un ambiente virtual, destacando los trabajos desarrollados con modelos numéricos [1] o aplicando elementos finitos [2]. Con base en lo anterior, el presente trabajo se ocupa específicamente del estudio de falla por esfuerzo de contacto y flexión, que tienen su origen durante los periodos de engranaje y que inicia en una pequeña área de contacto por rodamiento más que por deslizamiento [3,4]. Los engranes rectos inician su desgaste cerca de la línea de paso donde el contacto es básicamente entre superficies cilíndricas [3,4], es por eso que el diente debe ser lo suficientemente duro para soportar la carga y no desarrollar grietas. La metodología propuesta para el análisis de esfuerzo de contacto y flexión en engranes rectos se fundamenta en la metodología AGMA, para su posterior validación con Ingeniería Asistida por Computadora (CAE). Primero se analiza teóricamente el piñón de un sistema de transmisión con engranes rectos, aplicando las normas AGMA y sometido a una carga de trabajo específica. Se determinan los factores de corrección y se calcula el esfuerzo de contacto y flexión en un diente del engrane. El siguiente paso es modelar el piñón en CAD (Diseño Asistido por Computadora) y posteriormente se realiza un estudio aplicando el método del elemento finito computacional por medio de *PLM-Siemens NX v8.5*, para validar el resultado analítico del esfuerzo de flexión y desgaste a fatiga-vida total (ciclos). Se presentan resultados para los engranes rectos de un tren de transmisión

de dos escalonamientos aplicando la teoría AGMA y mediante CAE, se comparan las soluciones obtenidas en los procesos y se establecen las conclusiones pertinentes en la parte final de esta investigación.

## 2 ESPECIFICACIONES DEL TREN DE TRANSMISIÓN POR ENGRANES RECTOS

Como caso de estudio, en el presente trabajo se propone un tren de transmisión de engranes rectos de dos escalonamientos (figura 1) con los siguientes requerimientos de funcionamiento: potencia requerida para el sistema 30 hp, velocidad de entrada: 1750 rpm (motor trifásico de 30HP, voltaje = 220-440), velocidad de salida: 60 rpm, eficiencia de potencia mayor de 95%, espacio máximo 15x18x24 pulgadas, ejes de entrada y salida en línea, vida de engranes y cojinetes 12000 horas, vida infinita de ejes de tren de engranaje.

Considerando las especificaciones anteriores y aplicando la teoría de diseño de mecanismos [5,6], se determinan las velocidades angulares, pares de torsión, paso diametral, velocidades de línea de paso y cargas transmitidas para cada engranaje. Dichas especificaciones se presentan en la tabla 1.

## 3 DISEÑO MEDIANTE ECUACIONES DE ESFUERZO A FLEXIÓN Y DESGASTE PARA ENGRANES RECTOS POR LA METODOLOGÍA A.G.M.A

En función de las especificaciones de diseño mostradas en la tabla 1 para los engranes del tren de transmisión en estudio, se aplica la metodología AGMA [3,4] para determinar los esfuerzos de contacto, flexión y desgaste a fatiga-vida total (ciclos), así como, la adecuada selección de material para su manufactura en función de cada uno de ellos. A continuación, se detalla el procedimiento de análisis para el piñón-4.

### 3.1 Esfuerzo de desgaste en el piñón-4

El esfuerzo de desgaste (esfuerzo de contacto) del piñón-4 se obtiene en función de los factores de diseño, mediante la siguiente expresión:

$$\delta_{c4} = C_p \sqrt{W_t K_0 K_v K_s \left( \frac{K_m}{d_v F} \right) \left( \frac{C_f}{l} \right)} = 185400 \text{psi} \quad (1)$$

donde:

$$C_p = 2300 \sqrt{\text{psi}}$$

(Coeficiente elástico de aceros medio carbono),

$$K_0 = 1$$

(Factor de sobrecarga para carga uniforme),

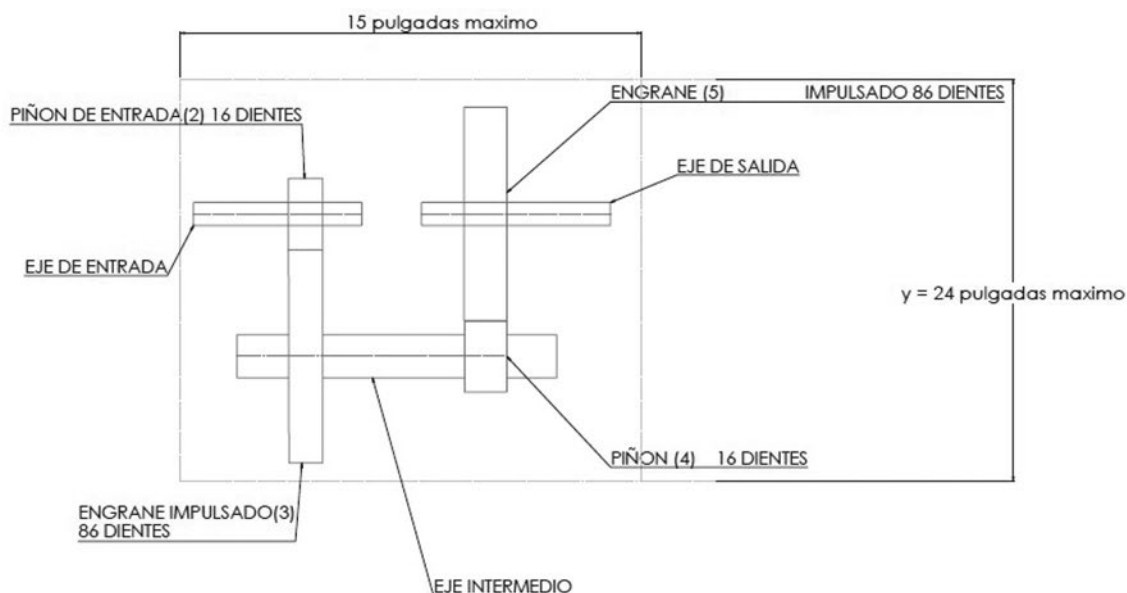


Figura 1. Esquema representativo del tren de transmisión por engranes rectos.

Tabla 1. Especificaciones de diseño del tren de transmisión.

Engrane	No. Dientes	Velocidad angular (rpm)	Torque (lb <sub>f</sub> /ft)	P <sub>d</sub> -Paso diametral (dientes/in)	d <sub>p</sub> -diámetro de paso (in)	Vel. líneas de paso (ft/min)	W <sup>l</sup> -Carga transmitida (lb <sub>f</sub> )
Piñón-4	N <sub>4</sub> =16	ω <sub>4</sub> =326	T <sub>4</sub> =484.12	6.1	2.66	V <sub>45</sub> =230.15	=4301.5
Impulsado-5	N <sub>5</sub> =86	ω <sub>5</sub> =60.6	T <sub>5</sub> =2602.32	6.1	14.3	V <sub>54</sub> =230.15	=4301.5
Piñón-2	N <sub>2</sub> =16	ω <sub>2</sub> =1750	T <sub>2</sub> =90.1	6.1	2.66	V <sub>23</sub> =1237	=800
Impulsado-3	N <sub>3</sub> =86	ω <sub>3</sub> =326	T <sub>3</sub> =484.12	6.1	14.3	V <sub>32</sub> =1237	=800

$$K_v = \left( \frac{A + \sqrt{V}}{A} \right)^B = \left( \frac{65.1 + \sqrt{230.15}}{65.1} \right)^{0.7310} = 1.16$$

(Factor dinámico en engranes),

$$Q_v = 7$$

(Nivel de exactitud en la transmisión-calidad comercial en engranes),

$$K_s = 1$$

(Factor de tamaño),

$$C_f = 1$$

(Factor de condición superficial),

$$m_G = N_{\text{impulsado}} / N_{\text{motriz}} = 86/16$$

(Relación de engranes),

$$m_N = 1$$

(Relación de distribución de carga),

$$I = \frac{\cos \phi \sin \phi}{2(m_N)} \frac{m_c}{m_{c+1}} = 0.1354$$

(Factor geométrico de resistencia al desgaste, con ángulo de presión  $\phi = 20^\circ$ ).

Teniendo una forma general para el ancho de un engrane de 5 veces el paso circular ( $5P_C = 5\pi d_p / N$ ), el ancho de la cara transversal del engrane es:

$$F = 2.618 \text{ in,}$$

y aplicando la ecuación de Factor de distribución de carga, se tiene:

$$K_m = C_{mf} = 1 + C_{mc}(C_{pf}C_{pm} + C_{ma}C_e) = 1.25$$

donde:

$$C_{mc} = 1; C_e = 1; C_{pm} = 1; C_{pf} = 0.0925; C_{ma} = 0.16$$

Para calcular el número de ciclos de esfuerzo en el piñón-4, que debe ser de 12000 horas, se tiene:

$$L_A = (12000 \text{ hr})(60 \text{ min/hr})(326 \text{ rpm}) = 2.3 \times 10^8 \text{ rev} \quad (2)$$

Sustituyendo valores en la ecuación del esfuerzo de contacto permisible AGMA:

$$\delta_{c4}(\text{permisible}) = \frac{S_c}{S_H} \frac{Z_N C_H}{K_I K_R} \quad (3)$$

y resolviendo para el esfuerzo permisible al desgaste en material, se obtiene:

$$S_c = 247200 \text{ psi,} \quad (4)$$

donde:

$$Z_N = 1.4488 L^{-0.023} = 1.4488 (2.3 \times 10^8)^{-0.023} = 0.9$$

(Factor de ciclos de esfuerzos de resistencia al desgaste),

$$C_H = 1$$

(Factor de relación de la dureza),

$$S_H = 1.2$$

(Factor de seguridad-desgaste recomendado por AGMA),

$$K_T = K_R = 1$$

(Factor de temperatura y Factor de confiabilidad).

### 3.2 Selección de material al desgaste para el piñón-4

Con el factor de seguridad establecido se necesita de un material que resista un esfuerzo requerido al desgaste de 247200 psi. De acuerdo con la norma ANSI/AGMA 2001-D04 [3,4], se selecciona un acero carburizado y endurecido grado 3 con una resistencia al desgaste de 275000 psi. Así entonces, el factor de seguridad definitivo al desgaste es:

$$S_H = \frac{S_c Z_N C_H / K_T K_R}{\delta_{ca}} = \frac{275000 \text{ psi} (0.9)}{195400 \text{ psi}} = 1.33 \quad (5)$$

### 3.3. Esfuerzo de flexión en el piñón-4

Utilizando la metodología AGMA, la ecuación del esfuerzo de flexión da como resultado:

$$\delta_{F4} = W^t K_0 K_v K_s \frac{P_d}{F} \frac{K_m K_s}{l} = 52801 \text{ psi}, \quad (6)$$

donde:

$$J = 0.27$$

(Factor geométrico de engranes rectos mediante gráfica AGMA 218.01),

$$K_B = 1$$

(Factor de espesor de aro).

Sustituyendo valores en la ecuación del esfuerzo de flexión permisible AGMA:

$$\delta_{F4} (\text{permisible}) = \frac{S_T}{S_F} \frac{Y_N}{K_i K_R},$$

y resolviendo para el esfuerzo de flexión permisible en material, se obtiene:

$$\delta_{F4} = 70401 \text{ psi}, \quad (7)$$

donde:

$$Y_N = 1,6831 L^{-0.0323} = 1.6831 (2.3 \times 10^8)^{-0.0323} = 0.9$$

(Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión),

$$S_F = 1.2$$

(Factor de seguridad- flexión recomendado por AGMA).

### 3.4 Selección de material a la flexión para el piñón-4

En función del factor de seguridad establecido, se necesita de un material que resista un esfuerzo de 70401 psi. De acuerdo con la norma ANSI/AGMA 2001-D04 [3, 4], se selecciona un acero carburizado y endurecido grado 3 con una resistencia a la flexión de 75000 psi. Así entonces, el factor de seguridad definitivo a la flexión es:

$$S_F = \frac{S_i Y_N / K_T K_R}{\delta_{F4}} = \frac{75000 \text{ psi} (0.9)}{52081 \text{ psi}} = 1.27 \quad (8)$$

Siguiendo el procedimiento descrito en las secciones 3.1-4, en la tabla 2 se presentan los resultados para los engranes restantes del sistema de transmisión.

## 4 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN ENGRANES MEDIANTE ELEMENTO FINITO COMPUTACIONAL

Para el análisis por medio de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) se modela en CAD cada uno de los engranes rectos [7] con el objetivo de determinar los esfuerzos de flexión y el número de ciclos de esfuerzo mediante un mapeo de la zona crítica. Tomando como referencia nuevamente el piñón-4, se realiza el modelado de la pieza con sus especificaciones geométricas. La simulación en *Siemens NX* con malla fina arroja un resultado  $\delta_{F4} = 53519.8 \text{ psi}$  e identifica el punto más crítico de la pieza (figuras 2a y 2b). Comparando los resultados teóricos y numéricos, hay una diferencia porcentual del 1.3%. Cabe mencionar que en los resultados de la simulación se utilizó un factor de seguridad de 1.2, siendo estos más conservadores que los resultados teóricos. En las simulaciones se aplica un acero al medio carbono, donde el software grafica en forma *S-N*, es decir, resistencia a la fatiga contra número de ciclos de esfuerzo (ANSI/AGMA 2001-D04). La solución CAE proporciona resultados con respecto a la vida total en ciclos y en este caso la simulación de fatiga arroja un resultado de  $2.12 \times 10^8$  ciclos, la diferencia porcentual entre el análisis analítico y el numérico es del 8%, siendo más conservador el de simulación (figura 2c).

Aplicando el mismo procedimiento de análisis CAE para los demás engranes del tren de transmisión, se obtienen los resultados del esfuerzo de flexión y resistencia a la fatiga-vida total (ver figuras 3-5). Al comparar dichos resultados con los teóricos, se observa que los determinados por CAE son más conservadores (tabla 3).

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se revela que la metodología propuesta para el análisis de esfuerzo aplicando CAE es más conservadora. El análisis por la metodología AGMA se puede considerar bastante confiable, sin embargo, depende principalmente de la experiencia y criterio del diseñador para la selección apropiada de los factores

**Tabla 2.** Esfuerzos, ciclos de carga, factores de seguridad y selección de material en engranes mediante la metodología AGMA.

Engrane	Esfuerzo de contacto permisible en material (psi)	Esfuerzo de flexión permisible en material (psi)	Esfuerzo de contacto permisible real (psi)	Esfuerzo de flexión permisible real (psi)	No. de ciclos de esfuerzo (rev)	Factor de seguridad definitivo al desgaste	Factor de seguridad definitivo a la flexión	Material al desgaste y flexión
Piñón-4	247200	70401	185400	52801	2.3x10 <sup>8</sup>	1.33	1.27	Acero carburizado y endurecido grado 3
Impulsado-5	96685	40732	80571	33944	4.3x10 <sup>7</sup>	1.7	1.38	Acero endurecido completamente grado 2, dureza 300HB
Piñón-2	132616	20974	98357	14857	1.26x10 <sup>9</sup>	1.5	2.5	Acero endurecido por flama grado 1
Impulsado-3	51286	12733	42739	9550	2.3x10 <sup>8</sup>	1.96	2.63	Acero endurecido completamente grado 1, dureza 200HB

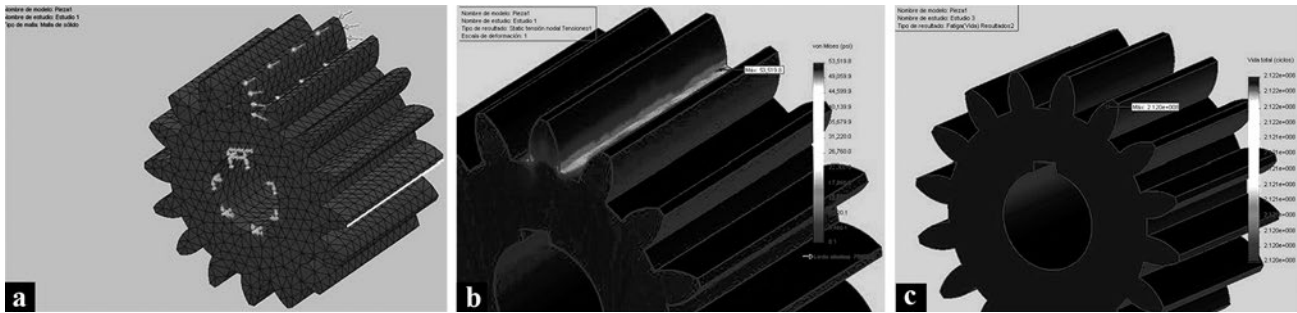
**Tabla 3.** Comparación de resultados teóricos (AGMA) respecto a los obtenidos mediante CAE.

Engrane	Esfuerzo de flexión permisible real (psi)	Esfuerzo de flexión permisible CAE (psi)	No. de ciclos de esfuerzo (rev)	No. de ciclos de esfuerzo CAE (rev)	Diferencia porcentual en Esfuerzo de flexión (%)	Diferencia porcentual en No. de ciclos de esfuerzo (%)
Piñón-4	52801	53519.8	2.30x10 <sup>8</sup>	2.122x10 <sup>8</sup>	1.3	8
Impulsado - 5	33944	1605.0	4.30x10 <sup>7</sup>	3.800x10 <sup>7</sup>	7	12
Piñón-2	14857	15355.6	1.26x10 <sup>9</sup>	1.101x10 <sup>9</sup>	3.3	13
Impulsado -3	9550	9466.8	2.30x10 <sup>8</sup>	2.002x10 <sup>8</sup>	1	13

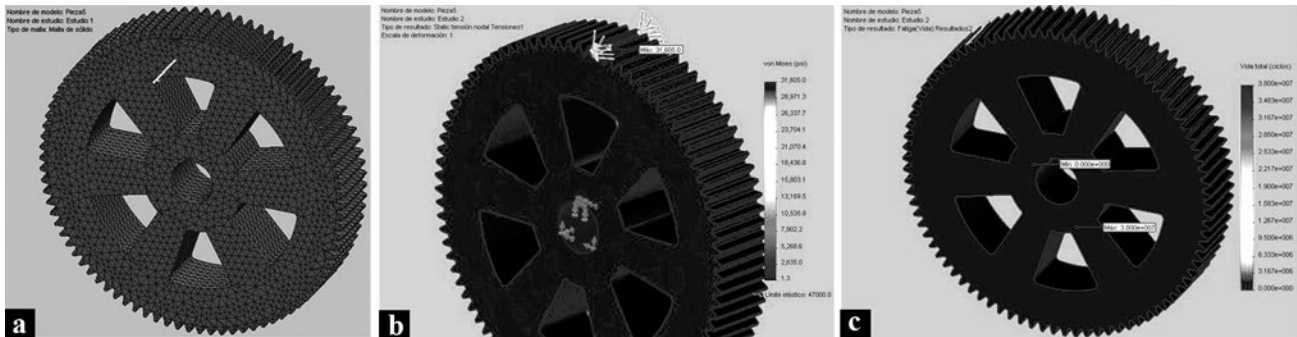
de corrección, ya que un ligero cambio puede alterar en un porcentaje considerable los resultados. El uso de software es una herramienta actual que va tomando fuerza e importancia dentro del ámbito de ingeniería, sin embargo, el análisis teórico siempre se debe realizar para complementar las decisiones finales de diseño.

## REFERENCIAS

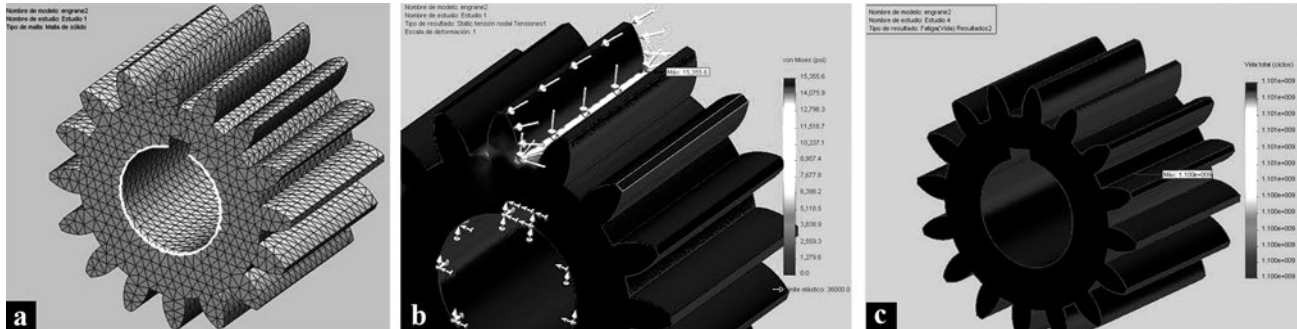
- [1] Pérez L., J.J. Coronado y H.E. Jaramillo, "Análisis de la falla ocurrida por esfuerzos de contacto en el eje-piñón de baja velocidad en el reductor de una extrusora de plástico", *El Hombre y La Máquina*, Universidad Autónoma de Occidente-Colombia 2006, no. 26, pp. 116-123.
- [2] I. González y A. Fuentes, "Análisis tensional por elementos finitos de engranajes rectos con geometría modificada", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, España 2004, v. 8, no. 1, pp. 15-30.
- [3] Richard G. Budynas y J.Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGraw-Hill, México (2012).
- [4] Robert L. Norton, *Diseño de máquinas*, Pearson, México (2011).
- [5] Arthur G. Erdman y George N. Sandor, *Diseño de Mecanismos Análisis y Síntesis*, Prentice Hall, México (1998).
- [6] Robert L. Norton, *Diseño de Maquinaria*, McGraw-Hill, México (2009).
- [7] Cecil Jensen, Jay D. Helsel y Dennis R. Short, *Dibujo y diseño en ingeniería*, McGraw-Hill, México (2005).



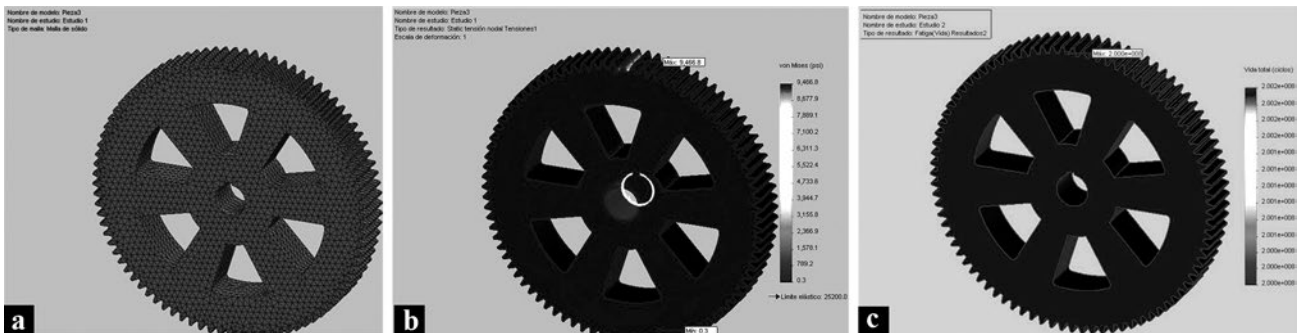
**Figura 2.** Análisis CAE mediante *Siemens NX* para el piñón-4: (a) Mallado fino obtenido por iteraciones, (b) Condiciones de frontera y resultados del esfuerzo de flexión en el punto más crítico, (c) Resultados de resistencia a la fatiga-vida total (ciclos).



**Figura 3.** Análisis CAE mediante *Siemens NX* para el engrane-5: (a) Mallado fino obtenido por iteraciones, (b) Condiciones de frontera y resultados del esfuerzo de flexión en el punto más crítico, (c) Resultados de resistencia a la fatiga-vida total (ciclos).



**Figura 4.** Análisis CAE mediante *Siemens NX* para el piñón-2: (a) Mallado fino obtenido por iteraciones, (b) Condiciones de frontera y resultados del esfuerzo de flexión en el punto más crítico, (c) Resultados de resistencia a la fatiga-vida total (ciclos).



**Figura 5.** Análisis CAE mediante *Siemens NX* para el engrane-3: (a) Mallado fino obtenido por iteraciones, (b) Condiciones de frontera y resultados del esfuerzo de flexión en el punto más crítico, (c) Resultados de resistencia a la fatiga-vida total (ciclos).





# La salud pública un indicador para validar la viabilidad de las tecnologías alternativas

Filiberto Candia García, Juan Carlos Carmona Rendón,  
Claudia Aida Landa García

## RESUMEN

A opinión personal se considera que en los últimos años la población se ha visto envuelta en un estilo de vida confortable que sufre constantes cambios por el desarrollo tecnológico, agrupados en tópicos como: cultura, sociedad, política y sobre todo tecnología en energías alternativas. Al mismo tiempo estas temáticas están ligadas con el mejoramiento de la calidad de vida del ser humano y de manera implícita se encuentra el acceso a la generación local de energía eléctrica mediante sistemas de Generación de Energía Eléctrica Mediante Tecnologías Alternativas (GEEMTA). Sin embargo en este momento surge la pregunta ¿Las nuevas tecnologías provocarán en un pronto futuro, una mayor problemática a la cual dan solución el día de hoy?, de manera precisa en este ensayo se analiza el impacto negativo que pueden representar los desechos contaminantes de los grandes avances tecnológicos en energía alternativa para la salud de la población.

**Palabras clave:** Energía alternativa, Sistemas de GEEMTA, Salud pública.

## ABSTRACT

A personal opinion is considered that in recent years the population has been wrapped in a comfortable lifestyle that is constantly changing by technological development, grouped into topics such as culture, society, politics and especially in alternative energy technology. While these issues are related to improving the quality of human life and is implicitly access to local power generation systems by Electricity Generation Using Alternative Technologies (GEEMTA). However at this point the question arises: New technologies provoke a soon future, a major issue which provide solutions to today?, precisely in this essay the negative impact that may represent waste contaminants analyzed technological breakthroughs in alternative for population health energy.

**Keywords:** Alternative Energy, GEEMTA Systems, Public Health.

## 1 INTRODUCCIÓN

Previo a la presentación del objetivo en el presente trabajo es de vital importancia mencionar y reflexionar sobre el uso y adquisición de la tecnología eléc-

trica y electrónica (*smart-phones, lap-tops, pantallas planas, videojuegos, etc.*). Esta tecnología juega un papel importante en forma de vida de la población regional, nacional e internacional –ya que permite tener una existencia llena de comodidades–. Sin embargo, que sucede después de adquirir un equipo de última generación tecnológica (que acata las más estrictas normas de fabricación sobre todo las ecológicas) y que ha llegado al límite de su vida útil ¿Qué se debe hacer con los residuos tecnológicos? Sin desgastar la respuesta generalmente su destino será el relleno sanitario local, como el de muchas otras tecnologías pasadas, que ahora son obsoletas.

Recibido: 10 de julio, 2014; aceptado 26 de agosto, 2014.

Filiberto CANDIA GARCÍA  
Juan Carlos CARMONA RENDÓN  
Facultad de Ingeniería, BUAP

Claudia Aida LANDA GARCÍA  
Egresada de la Carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería de la BUAP.

La misma situación presentan las actuales y futuras tecnologías alternativas en generación de energía eléctrica residenciales (mientras se siga dependiendo del silicio, como elemento esencial de los sistemas de GEEMTA fotovoltaicos). Al término de su vida útil su destino será el relleno sanitario, ya que no es posible reciclar el silicio de los paneles solares.

En el sistema educativo de Nivel Superior, se reconoce que los elementos que componen a los sistemas de GEEMTA no cuentan con un fácil proceso de reciclaje. México como país tampoco cuenta con una cultura y tecnología apropiada para separar y reciclar los desechos contaminantes, que son un problema latente y preocupante para el medio ambiente y la salud pública (realidad que se puede observar en el sistema de recolección de basura municipal, donde el camión mezcla y revuelve todos los desechos orgánicos e inorgánicos y que posteriormente se confinan en un vertedero único).

Ampliando la preocupación de los autores sobre el daño a la salud pública que pueden ocasionar los desechos de silicio que son transmitidos al medio ambiente por la carencia de medios para su adecuado tratamiento y posterior desecho. El presente documento pretende crear conciencia de este hecho y orientar a la población sobre el tema.

## 2 DESARROLLO

Como primer punto de reflexión se define el término de salud pública: “Este concepto está saturado de significados ambiguos, el primero equipara el adjetivo *pública* con una acción gubernamental, esto es, el sector público (Frenk, 1997)” en donde el término público hace énfasis únicamente a una obligación de las dependencias de gobierno... “se identifica la salud pública con los llamados *servicios no personales de salud*, es decir, aquellos que se aplican al ambiente (por ejemplo, el saneamiento) o a la colectividad (por ejemplo, la educación de las masas de modo que acepten los programas de salud) y que por lo tanto no son apropiables por un individuo específico (Frenk, 1997).”

Las discrepancias conceptuales de salud pública ponen en riesgo a la seguridad social y el porvenir de las generaciones futuras, en cuanto a una calidad de vida y longevidad con dignidad.

Por ello es loable la intención del presente documento, al relacionar mediante la atención a la salud pública, el efecto negativo que provoca la contaminación por desechos tecnológicos y las repercusiones que afectan a la población como masas y no como

individuos. Ante esta realidad es necesario que la educación ecológico-tecnológica se fomente en cada individuo como persona y empiece a favorecer su entorno ecológico desde el hogar, continúe en las escuelas y sea fortalecido como programa de apoyo por parte del gobierno, formando una espiral fundada con el buen hábito del reciclado y la separación de los desechos peligrosos.

La actual situación de contaminación en el México de nuestros días, es preocupante, ya que el país no cuenta con la infraestructura adecuada para la ardua labor de recolección, separación, reciclaje y confinamiento de residuos tecnológicos, tóxicos, radioactivos y biológicos. Este trabajo presta una específica atención a los desechos de los equipos tecnológicos de las llamadas tecnologías verdes (en específico a las fotoceldas, que tienen una alta difusión y promoción como alternativas de solución viables en el suministro de energía eléctrica, en beneficio de disminuir el pago de la facturación por consumo de la misma).

En este punto se debe hacer hincapié en crear un hábito de conciencia ambiental en el uso de esta tecnología verde, por parte de cada una de las dependencias públicas y privadas y sobre todo del usuario final.

De la misma manera las dependencias gubernamentales encargadas de la recolección de basura y la sociedad en su carácter de productor de desechos peligrosos; deberán contribuir de manera conjunta a un beneficio común, incrementar la capacidad de reciclaje de los desechos tecnológicos. Es decir, homologar las intenciones de “aquellos que contribuyen, de aquellos que no saben como hacerlo y de aquellos que no les interesa”. De esta manera se educará de una pronta manera sobre uso y manejo de los residuos fotovoltaicos (Candia y Galindo, 2012).

### 2.1 Reciclaje en los Sistemas de GEEMTA

Una celda fotovoltaica compuesta por dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), es una fuente de energía cuyo voltaje de salida varía en relación con la intensidad luminosa que incide sobre su superficie (Maloney, 2006). En este caso se considera el elemento más contaminante de un sistema de GEEMTA (ya que se considera que el sílice es el causante de la enfermedad llamada silicosis o enfermedad de los mineros y que en un ambiente no controlado y expuesto a la atmósfera puede afectar la salud pública de las masas).

Los sistemas fotovoltaicos son altamente promocionados en México por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como tecnología verde para la

sustentabilidad de la Nación, pero sin una prospección de su manejo como desecho contaminante de la misma tecnología.

## 2.2 Composición de una fotocelda

Una celda fotovoltaica se integra por silicio y plomo como componentes activos más importantes (tabla 1). De los cuales se estima que no es posible aprovecharlos para reciclaje, ya que son desechados a cielo abierto en un tiradero que en muchas ocasiones puede ser clandestino.

Esta situación permite que el silicio y el plomo como desechos, puedan combinarse con otros lixiviados e incrementar su capacidad contaminante, hacia el suelo y los mantos freáticos:

**Tabla 1.** Clasificación de los elementos contaminantes que componen una fotocelda

No.	Componente	% de reciclaje
1	Marco de aluminio	100
2	Obleas de silicio	0
3	Materiales plásticos	0
4	Soldadura Plomo-Estaño	0
5	Cubierta de vidrio plano	100

Por otro lado la sociedad también ha cometido errores al intentar crear una cultura para la separación y recolección de residuos contaminantes; ya que ha destinado lugares estratégicos como parques, centros comerciales, así como lugares públicos en general, donde la población se encuentra en contacto directo con las emisiones a la atmósfera. Acciones que representan un retroceso en el proceso de la educación ecológica.

Por lo anterior se debe trabajar conjuntamente en: hogares, escuelas, lugares públicos y gobiernos para aprender a clasificar y reutilizar los desechos de las nuevas innovaciones tecnológicas.

## 2.3 Alternativas

Actualmente existen depósitos particulares de compra-venta de materiales reciclables con el doble fin de ayudar a la economía de quienes se dedican a esta actividad y por otro lado disminuir la contaminación que ha afectado tanto al medio ambiente, sin embargo el sílice no se proyecta como un componente de alta capacidad de reciclaje y de ser así la salud de las personas involucradas se vería altamente comprometida, disyuntiva que lleva una doble relación de perder-perder.

De manera inminente es necesaria una propuesta

para una adecuada recolección y confinamiento de residuos peligrosos de los sistemas de GEEMTA, por parte del gobierno, este debe crear una política pública y educativa; para establecer los lugares y medios adecuados (depósitos públicos, forma de transporte para cada clasificación, determinar el lugar más eficiente de acuerdo a las propiedades de materiales peligrosos). Con esto se logrará reducir la probabilidad de reacciones en contra del medio ambiente, sobre todo la afección a la salud pública de la comunidad, como en el caso de la silicosis<sup>1</sup>. “La respuesta de la sociedad empieza desde el momento en que las condiciones de salud son definidas como necesidades. Los factores mediadores de la equidad, la calidad y la tecnología permiten entonces calcular los servicios requeridos para satisfacer tales necesidades. A su vez, la accesibilidad y la productividad establecen las equivalencias en términos de los recursos requeridos para producir dichos servicios. Estos fenómenos dan contenido a los sistemas de salud. Es indispensable, además, entender la estructura del sistema, pues de ella dependerá la forma concreta en que se definan las insuficiencias, se produzcan los servicios y se movilicen los recursos (Frenk, 1997)”.

Al implementar una política pública, se implica que esta deberá normar a las empresas comercializadoras a establecer en sus servicios una póliza de retorno de fotoceldas, para disminuir el comercio de los componentes individuales de las celdas fotovoltaicas y el efecto de la contaminación al medio ambiente que se genera.

Para el manejo de desechos tecnológicos por uso y aplicación de las tecnologías verdes en específico, se deberá implementar un centro de canje en las dependencias de CFE, que permitan al cliente un lugar más accesible para poder confinar los desechos generados, al mismo tiempo que se ayuda a los fabricantes a reutilizar componentes que se encuentran en buen estado. Por ejemplo el caso específico de celulares, que de cierto modo resultan obsoletos para el usuario por diferentes razones de mercadotecnia, es probable

<sup>1</sup> Silicosis es la neumoconiosis producida por inhalación de partículas de sílice, entendiéndose por neumoconiosis la enfermedad ocasionada por depósito de polvo en los pulmones con una reacción patológica frente al mismo, especialmente de tipo fibroso. Encabeza las listas de enfermedades respiratorias de origen laboral en países en desarrollo, donde se siguen observando formas graves. El término silicosis fue acuñado por Visconti en 1870 aunque desde antiguo se conocía el efecto nocivo del aire contaminado para la respiración. La silicosis es una enfermedad fibrósica-pulmonar de carácter irreversible y considerada enfermedad profesional incapacitante en muchos países. Ziskind M, Jones RN, Weill H. Silicosis. *Am Rev Respir Dis* 1976; 113:643-55.

que cambie su equipo por uno de mejor calidad y más tarde se deshaga del anterior, la propuesta principal es ayudar a las personas a crear el hábito, y al mismo tiempo la facilidad para las empresas fabricantes de reciclar, fomentando la posibilidad de contar con piezas de refacción o bien piezas reutilizables.

Frenk (1997) comenta que “LA SALUD PÚBLICA requiere de un nuevo estilo de liderazgo”<sup>2</sup> esta premisa permite reflexionar en que uno de los componentes importantes de este liderazgo es la educación permanente hacia el entorno ambiental. La educación por un lado tiene como fin enfocarse a detectar necesidades insatisfechas y oportunidades emergentes, que permitan guiar la selección de prioridades; y por otro, determinar los efectos que provocan el uso de los conocimientos en desarrollos tecnológicos o en procesos más racionales de toma de decisiones.

Como la educación ecológica conduce a la formación del buen hábito para confinar desechos contaminantes, se debe empezar en casa con ayuda de familiares y amigos que pueden difundir esta actividad. Con apoyo de las escuelas públicas y privadas se desarrollan nuevos proyectos para espacios de confinamientos provisionales, antes del destino final de los desechos. También se debe instruir a las masas, sobre cómo realizar la separación y para qué sirve; continuado lo anterior con apoyo del sistema de gobierno, que se debe encargarse de la parte ejecutora.

Si se crea un bucle de sinergia hacia el cuidado del medio ambiente, las naciones pueden obtener un gran beneficio a favor del medio ambiente y de la salud pública de las nuevas generaciones.

### 3 DISCUSIÓN

Para la sociedad el problema de contaminación y las enfermedades crónicas infecciosas, se han vinculado a la población como un suceso cotidiano por el uso de los avances tecnológicos. Situación que pareciera no tener solución, pero con los avances tecnológicos e investigaciones se han logrado cambios positivos en relación al mejoramiento de la calidad de vida de la población, si cada uno de nosotros ayuda con los desechos que genera, los porcentajes de desechos contaminantes pueden disminuir considerablemente.

“Ante la superación de las enfermedades infecciosas comunes y el auge de las enfermedades crónico-degenerativas, algunos autores hablan de una “nueva salud pública” que se ocupa de la promoción de la

salud a través del cambio de los estilos de vida, en contraste con la salud pública tradicional, que actuaba sobre los aspectos biológicos del individuo y el medio ambiente (Ashton, 1988)”.

Entonces se deben prever las implicaciones del uso y aplicación de la tecnología en sistemas de GEEMTA, en deterioro de la salud pública.

#### 3.1 A favor de la salud pública

“La prospectiva es primero un acto imaginativo y de creación; luego, una toma de conciencia y una reflexión sobre el contexto actual; y por último, un proceso de articulación y convergencia de las expectativas, deseos, intereses y capacidad de la sociedad para alcanzar un porvenir que se perfila como deseable (Miklos, 2007)”.

De cualquier manera en que se utilice el contexto de prospectiva, es importante resaltar su carácter creativo, la inclusión de elementos de cambio y transformación que engloban, y de algún modo, la idea que se presente para adoptar una actitud eficiente hacia el futuro, por medio de la selección de futuribles.

El objetivo de la prospectiva es “construir el camino” para el mañana, convirtiéndolo en ideal (deseable y posible), encamina los actos presentes y el campo de lo “realizable” del futuro. Esta premisa sobre la prospectiva tiene como premisa mostrar escenarios que involucren un acto de reflexión social y tecnológica que ayude a determinar las mejores condiciones de un futurible.

Los siguientes escenarios se intuyen (en perspectiva personal) a 20 años, por ser el tiempo de vida útil de las fotoceldas que actualmente se instalan en residencias y alumbrado público y que serán incluidos como parte de los desechos contaminantes de un relleno sanitario o tiradero al aire libre:

- Pesimista al año 2034:

La sociedad no realiza acciones para evitar la contaminación ambiental por silicio, por lo cual no existen contenedores y lugares apropiados para su confinamiento y desecho final. Se contamina el aire, el suelo y agua mostrando un elevado número de casos clínicos por silicosis aguda e infecciones de vías respiratorias y estomacales.

- Secuencial al año 2034:

La sociedad desarrolla actividades para prever actos de contaminación ambiental por silicio. Se han desarrollado contenedores apropiados para su recolección. Sin embargo su desecho final es en los rellenos y tiraderos municipales,

<sup>2</sup> Que sea con autogestión y adquisición de poder desde los estudiantes de educación superior.

se contamina el aire, suelo y agua, exhibiendo casos clínicos por silicosis aguda e infecciones de vías respiratorias y estomacales.

- **Utópico al año 2034:**

La población nacional e internacional desarrolla acciones estratégicas para evitar la contaminación ambiental por silicio. Existen contenedores adecuados para su confinamiento, y depósitos para su desecho final. Se evita la contaminación del aire, suelo y agua, no se reportan casos clínicos por silicosis aguda e infecciones de vías respiratorias y estomacales.

- **Futurible al año 2034:**

La sociedad nacional adopta conciencia y comprende los riesgos por contaminación por silicio hacia la salud pública. Se utilizan contenedores y depósitos para los desechos de celdas fotovoltaicas. Se optimiza el reciclado de los sistemas de GEEMTA en desuso y se promueve un reciclaje responsable, para prevenir la contaminación del aire, suelo y agua, evitando casos clínicos por silicosis aguda e infecciones de vías respiratorias y estomacales.

## CONCLUSIONES

La presente reflexión permite deducir de manera asertiva los argumentos referidos al inicio del documento:

- El silicio se muestra como un agente contaminante del ambiente (aire, agua y suelo), con alto riesgo para la salud pública, ya que no existe un conocimiento de su comportamiento al término de su vida útil.
- La población no está preparada en infraestructura y tecnología para aislar desechos de silicio por sistemas de GEEMTA.
- No se ha determinado la adecuada caracterización de los sistemas de GEEMTA, para proponer la cantidad de contenedores responsables, para los desechos de las tecnologías verdes.
- Aun no se ha cuantificado y proyectado el porcentaje de desecho de silicio por carencia de información, pero se ha definido que existen

agentes contaminantes combinados de silicio y plomo-estaño (que son de muy alto riesgo), por lo que se necesita atender esta combinación antes de que se conviertan en lixiviados.

- Si no se atiende pronto la futura problemática de contaminación por silicio, la sociedad está expuesta a disminuir su capacidad económica para atender la salud pública, al estar expuesta a un alto riesgo de adquirir enfermedades respiratorias como la silicosis por contaminar su medio ambiente.

El desarrollo del presente trabajo resalta la necesidad de profundizar estudios sobre el tópico planteado. La situación descrita requiere de gestiones e investigaciones que permitan:

- Delimitar de forma precisa los riesgos hacia la sociedad.
- Proponer tecnologías verdes que tiendan a satisfacer el desarrollo sustentable del país, sin deterioro del medio ambiente.
- La formación de grupos de investigación multidisciplinarios.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Frenk Julio, La Salud De La Población, Hacia Una Nueva Salud Publica, 1ª. Reimpresión 1997, Fondo De Cultura Económica, México, 1993 (La Ciencia Para Todos libro 133).
- [2] Candia y Galindo, (2012) La contaminación por silicio una proyección negativa del uso de tecnologías alternativas. Memorias del 2º. Congreso de Tecnología, FES UNAM Cuautitlán. ISBN: 978-607-02-3266-4.
- [3] Ashton, J., y H. Seymour. The New Public Health: The Liverpool Experience. Open University Press, 1988. Buckingham, Inglaterra.
- [4] Maloney, Timothy j. (2006). Electrónica Industrial Moderna. Pearson Educación. 5ª Edición. México. ISBN: 970-26-0669-1.
- [5] Miklos, Tomas (2007). Planeación Prospectiva: Una estrategia para el diseño del Futuro. Mexico: Limusa: Centro de estudios prospectivos Fundación Javier Barros Sierra. ISBN-13: 978-968-18-3848-5.

# Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

La invitación se apertura a todos los documentos que pueden ser reportados mediante, ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN, ARTÍCULOS DE REVISIÓN, ARTÍCULOS DE BUENAS PRÁCTICAS, INFORMES TÉCNICOS y COMUNICACIONES CORTAS y DE PROSPECTIVA, y que se realizan en el idioma español. Estos trabajos deben ser originales e inéditos y no deben de estar siendo considerados en otra revista para su publicación. El autor es el único responsable de las afirmaciones sostenidas en su artículo. Los comentarios y su respuesta serán situados en <http://www.ingenieria.buap.mx>.

## Requisitos, Plantilla y Estructura del trabajo

- Los originales se remitirán preferentemente por correo electrónico a [posgrado.fi.buap@gmail.com](mailto:posgrado.fi.buap@gmail.com), en su defecto serán entregados directamente al editor responsable en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería.
- El formato del artículo enviado debe de prepararse mediante una plantilla que se puede descargar en: <http://www.ingenieria.buap.mx>.
- En la medida de lo posible, se debe evitar utilizar un lenguaje de corte excesivamente especializado y el abuso en la utilización de funciones matemáticas, en beneficio de una más fácil comprensión de las ideas expuestas.

Los artículos pueden ser redactados en castellano o inglés (para autores extranjeros), aunque se dará prioridad de Publicación a los que están en ambos idiomas. Sus requisitos son los siguientes:

- El trabajo se debe acompañar de una Carta (o e-mail) de presentación donde el autor solicita la consideración de su trabajo para su publicación indicando:
  - Que es un trabajo original no publicado en otros medios o revistas.
  - Que el artículo no ha sido enviado simultáneamente a otros medios o revistas.
  - Claramente estos tres apartados: Cuál es la aportación original que el trabajo presenta, por qué se ha llevado a cabo y cuáles son los resultados reales obtenidos.
  - Confirmación de la autoría de todos los autores que figuran en el artículo y su contribución intelectual al mismo.
  - Que todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito remitido.
  - Que en el caso de aceptación para su publicación, los autores ceden los derechos al editor, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados.
- En el caso de que los autores deseen recomendar a tres expertos en la especialidad de su trabajo como posibles evaluadores, podrán hacerlo en esta carta de presentación indicando sus datos de contacto: nombres, e-mail, teléfono, lugar de adscripción.

Con el objeto de facilitar el proceso de "Revisión entre pares", el autor deberá asignar el código INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo (en concordancia con CONACyT), seleccionándolo de entre los códigos disponibles en el sitio <http://www.ingenieria.buap.mx>.

## Formato del artículo

Para la presentación del trabajo se debe utilizar la plantilla Word de formato de artículo, descargable en: <http://www.ingenieria.buap.mx>. Las extensiones para el envío de artículos pueden ser .doc (msword), .rtf, o .txt.

## Cabecera:

- Título del artículo: (en castellano e inglés). El título será breve y conciso con una longitud máxima de 15 palabras. Si es necesario se puede añadir a continuación un subtítulo separado por un punto. Evitar el uso de expresiones vacías, símbolos, fórmulas, abreviaturas o acrónimos.
- Nombre y dos apellidos de cada uno de los autores. Se acompañará un breve currículum y fotografía del autor, si éste así lo deseara, al final de la bibliografía.
- Nombre completo del centro de trabajo de cada uno de los autores, el cual tendrá su referencia debajo del nombre del autor.
- E-mail y número de teléfono.
- El Resumen (en español e inglés) del trabajo será de una extensión máxima de 300 palabras. Se describirá de forma concisa, el motivo y el objetivo de la investigación, la metodología empleada, los resultados más destacados y las principales conclusiones.
- Palabras clave (en castellano e inglés): Debajo del resumen se especificarán de 3 a 5 palabras clave o frases cortas que identifiquen el contenido del trabajo para su inclusión en los repertorios y bases de datos nacionales e internacionales.

## Texto del artículo:

El artículo tendrá una extensión máxima de 6,000 palabras (En casos excepcionales, se podrá concertar con el editor responsable de RITFIBUAP una extensión superior, la cual será sometida a la aprobación del Consejo de Redacción.)

Todas las siglas citadas deberán ser aclaradas en su significado.

Se utilizarán cifras arábigas para la paginación y para la numeración de los apartados y sub-apartados del artículo. La utilización de unidades de medida seguirá la normativa del Sistema Internacional.

## Imágenes, figuras y gráficas

Se recomienda para imágenes, gráficas y fotografías una calidad mínima de 300 ppi; esas se deben adjuntar por separado en un archivo anexo, agregando en ambos archivos la referencia correspondiente (ej: Figura 1, Imagen 1, Fotografía 1, etc.). Los dibujos de líneas deben tener una resolución mínima de 800 dpi (preferiblemente 1200 dpi).

## Referencias bibliográficas

Estas se adaptarán de acuerdo al formato de referencias Harvard o IEEE.

[1] Alaniz-Álvarez (2003). La Revista Mexicana de Ciencias Geológicas a través de los índices de impacto del Institute for Scientific Information. Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVI, Núm. 1, 2003, P. 87-98.

# DIRECTORIO TUTORES

**SALVADOR  
MOZO ARISTA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2008 y 2013



**ENRIQUE  
MONTIEL PIÑA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Rev. y Conv. 2012



**FÉLIX AUGUSTO CÉSAR  
PÉREZ CORDOVA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2008 y 2012



**ANA ELENA  
POSADA SÁNCHEZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2009 y 2014



**DOMINGO  
RODRÍGUEZ FLORES**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2014



**OSCAR LUIS  
SÁNCHEZ FLORES**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2013



**JULIÁN ALFREDO  
VELÁZQUEZ ROMERO**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2013



**EDGAR IRAM  
VILLAGRÁN ARROYO**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2009 y 2014



**EDUARDO  
VILLANUEVA HERNÁNDEZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA CIVIL  
Generación 2010



**MÁXIMO  
ÁVILA CRUZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA  
Generación 2008 y 2014



**MARCOS  
ARELLANO DÍAZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA  
Generación 2013



**ÁNGEL CECILIO  
GUERRERO ZAMORA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA  
Generación 2012



**JOEL  
PANOHAYA ANALCO**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA  
Generación 2010



**JOSÉ DE LA LUZ  
RAMÍREZ MENDOZA**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA  
Generación 2011



**JOSÉ ABRAHAM  
TORRES MÉNDEZ**  
TUTOR DEL COLEGIO  
DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA  
Generación 2009



**Coordinación de Tutores  
Facultad de Ingeniería**  
Edificio Luis Barragán, Cubículo 3  
Ciudad Universitaria BUAP  
+52 (222) 229-5500 \* 7642  
[www.ingenieria.buap.mx](http://www.ingenieria.buap.mx)



"Estoy de paso en la universidad", "cumpló con el requisito de un título para una promoción", "voy hacerme cargo del negocio familiar", son parte de la actual **motivación** de los estudiantes de nivel superior. Atrás han quedado las intenciones de **transcender** el "ser el orgullo de mi familia", "quiero atender las necesidades de mi comunidad", "me revelo a las injusticias sociales en las zonas marginadas", han dejado de ser las premisas que mueven el motor de la **formación** de un ingeniero, ahora el concepto desconocido es el **ingenio**. Si bien estamos ante una nueva sociedad del conocimiento, también estamos en una nueva sociedad carente de **creatividad**, que demanda líderes académicos que renueven la autonomía nacional. Si Morín reflexiona por los siete saberes para la educación del futuro, la Facultad de Ingeniería atiende la **comprensión** de la ingeniería como un sentir compartido en la **mejora** de una nación. Se proclama que el **ingenio** es el actual sello de **identidad institucional** que promueve a la **productividad**.

**BUAP**

**INGENIERÍA**  
FACULTAD