



Ingeniería. Investigación y Tecnología

ISSN: 1405-7743

iit.revista@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de México
México

Mendoza Domínguez, A.; Graniel Peralta, M.
Estimación de emisiones a la atmósfera provenientes de quemadores elevados de instalaciones
petroleras en la Sonda de Campeche
Ingeniería. Investigación y Tecnología, vol. VII, núm. 3, julio-septiembre, 2006, pp. 165-173
Universidad Nacional Autónoma de México
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40470303>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Estimación de emisiones a la atmósfera provenientes de quemadores elevados de instalaciones petroleras en la Sonda de Campeche

A. Mendoza-Domínguez y M. Graniel-Peralta

Departamento de Ingeniería Química y Centro de Calidad Ambiental, ITESM Campus Monterrey
E-mails: mendoza.alberto@itesm.mx y mgranielp@pep.pemex.com

(Recibido: mayo del 2005; aceptado: noviembre de 2005)

Resumen

PEMEX Exploración y Producción (PEP), realiza venteos de gas asociado a través de quemadores elevados tipo antorcha en sus instalaciones de producción de la Sonda de Campeche, lo cual permite controlar las presiones en los separadores y líneas de conducción de dichas instalaciones. Este estudio se centra en cuantificar las emisiones atmosféricas provenientes de los quemadores pertenecientes a la Región Marina Noreste de PEP. Para ello, se elaboró un inventario de emisiones para seis diferentes episodios de estudio entre noviembre de 2000 y noviembre de 2001, a fin de diagnosticar el comportamiento de las emisiones a través de diferentes condiciones meteorológicas. El inventario presentado fue para CO, CO₂, SO₂, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales e hidrocarburos no quemados. El inventario se construyó empleando factores de emisión, en los cuales se factorizaron ineficiencias de combustión teóricas, debidas a las condiciones meteorológicas imperantes en la zona. Los resultados obtenidos, muestran emisiones considerables de H₂S y compuestos orgánicos no quemados por ineficiencias de combustión en los quemadores, estimadas entre 22% y 44%.

Descriptores: Contaminación atmosférica, inventario de emisiones, combustión, factores de emisión, plataformas marinas.

Abstract

PEMEX Exploration and Production (PEP) performs venting of associated gas through high torch-type burners in its production facilities in the southern most part of the Gulf of Mexico (Sonda de Campeche), allowing control of operation pressures of separators and pipe lines in such facilities. This study focuses in estimating the amount of atmospheric emissions originated from burners in PEP's North east Marine Region. Thus, an emission inventory for six different study episodes between November 2000 and November 2001 was elaborated, with the objective of diagnosing the emissions' behaviors throughout different meteorological conditions. The inventory was generated for CO, CO₂, SO₂, nitrogen oxides, total suspended particles and unburned hydrocarbons. The inventory was assembled using emission factors that account for theoretical combustion inefficiencies due to meteorological conditions. The results show considerable amounts of H₂S and unburned organic compounds due to combustion inefficiencies that ranged between 22% and 44%.

Keywords: Air pollution, emissions inventory, combustion, emission factors, marine platforms.

En la actualidad, existe información limitada de



de la lluvia ácida en el Golfo de México (Parungo *et al.*, 1990; Bravo *et al.*, 2000 y 2004), pero sin relacionar directamente las fuentes de emisión con los efectos ambientales. Gamboa-Rodríguez *et al.* (2004) realizaron un estudio para relacionar niveles de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente con actividades de la industria petrolera, pero en zonas tierra adentro del Estado de Tabasco. Recientemente, Villaseñor *et al.* (2003), reportaron un inventario de emisiones integral de las operaciones de exploración y producción en la Sonda de Campeche. Sin embargo, el inventario reportado no considera el efecto de las ineficiencias de combustión en las emisiones de los quemadores elevados, debidas a condiciones meteorológicas locales. Así, en el presente artículo se presentan estimaciones de las emisiones provenientes de los quemadores elevados tipo antorcha de gas operados por PEMEX en la RMNE derivadas de la aplicación de una técnica para calcular la eficiencia de los quemadores con base en las condiciones meteorológicas imperantes, y así corregir las estimaciones de las emisiones obtenidas puramente por factores de emisión. Esta información es relevante, ya que se puede emplear como base para estudiar posteriormente el efecto potencial de las emisiones a lo largo de la costa del Golfo de México, tanto en la salud de los habitantes en actividades como la agricultura y en los bienes materiales (por ejemplo, lluvia ácida), como en la calidad escénica (visibilidad) de la región.

Metodología

Fuentes de información

Debido a que la altura de los quemadores tipo antorcha típicamente sobrepasa los 18 metros y no se cuenta con tecnologías para la medición rutinaria de estas emisiones, generalmente se realiza una estimación de la emisión de los contaminantes empleando factores de emisión reportados en la literatura. En la figura 1 se muestra la zona en donde están ubicadas las instalaciones marinas de producción de la RMNE, las cuales fueron sujeto de este estudio. Se utilizó información correspondiente al período de noviembre del 2000 a noviembre del 2001 con el fin de observar las variaciones estacionales de las emisiones. En particular, se seleccionaron los

períodos presentados en la tabla 1 como representativos de las diferentes estaciones del año. Un criterio fundamental para seleccionar estos períodos fue que no existieran huecos de información meteorológica necesaria para corregir las estimaciones de emisiones derivadas de la aplicación de los factores de emisión. En cuanto a los volúmenes de hidrocarburos enviados a quemadores, se utilizó la información de los Centros de proceso marinos Akal-C, Akal-J, Akal-N, Nohoch-A, Ku-A y Ku-H, así como la del CPTGA. Esta información fue proveída en promedios horarios. Asimismo, se utilizó información meteorológica horaria de cinco estaciones, ubicadas dentro del área de estudio para generar los campos meteorológicos requeridos en la estimación de emisiones. Las estaciones de donde provino la información fueron: Terminal Marítima Cayo Arcas, Terminal Marítima Dos Bocas, Plataforma de Telecomunicaciones Ixtoc-A, Plataforma de Telecomunicaciones Eco-1 y Plataforma de Rebombeo.

Tabla 1. Períodos de estudio seleccionados

Período	Fechas
Otoño 1	01/Nov/2000 – 11/Nov/2000
Otoño 2	05/Dic/2000 – 19/Dic/2000
Invierno 1	21/Dic/2000 – 06/Ene/2001
Invierno 2	11/Ene/2001 – 25/Ene/2001
Primavera	25/Mar/2001 – 05/Abr/2001
Verano	17/Ago/2001 – 26/Ago/2001

Generación del inventario de emisiones

Se estimaron las emisiones horarias de SO_2 , H_2S , NO_x , CO , CO_2 , PS , y compuestos orgánicos totales (COT) provenientes de 16 quemadores elevados, así como un quemador de fosa. Para la formulación de los factores de emisión, se consideraron métodos desarrollados para operaciones de producción y de proceso de la industria petrolera (US EPA, 1995; ERG, 1999). La estimación de emisiones de H_2S , SO_2 y CO_2 , considera la razón de conversión como función de la eficiencia de la combustión. Por ejemplo, el cálculo de la emisión de H_2S (masa emitida por unidad de tiempo) se expresa como:

$$E_{H_2S} = Q \dot{Y}_{H_2S} \left(\frac{\dot{E}_A}{C} \frac{1}{\phi} \right) \dot{Y} (1 - M_{SO_2}) \dot{Y} PM_{H_2S} \quad (1)$$

donde E_{H_2S} es la emisión de H_2S , Q es el flujo volumétrico de gas quemado, \dot{Y}_{H_2S} es la fracción molar de H_2S en el gas quemado, C es el volumen molar del gas ideal, M_{SO_2} es la razón de conversión molar de H_2S a SO_2 (basado en la estequiometría y suponiendo una conversión dependiente de la eficiencia de la combustión), y PM_{H_2S} es el peso molecular del H_2S . Formas similares a la ecuación (1) fueron empleadas para estimar las emisiones de SO_2 y CO_2 . Para las emisiones de CO y NO_x se consideran estimaciones de acuerdo al poder calorífico del gas quemado. Así, por ejemplo, para el compuesto i ($i = CO$ o NO_x) se tiene:

$$E_i = Q \dot{Y} FE_i \dot{Y} PC_{GN} \quad (2)$$

donde E_i es la emisión del compuesto i , PC_{GN} es el poder calorífico del gas natural (1,532.165 BTU/ft³, según datos proporcionados por PEMEX), y FE_i es el factor de emisión (FE_{CO} es igual a 0.37 lb/10⁶ BTU, y FE_{NO_x} es igual a 0.068 lb/10⁶ BTU). Para el caso de las PS, se tomó un factor de emisión promedio de 6.77 lb/10⁶ ft³ de gas quemado, el cual corresponde a quemadores con humeo medio. Finalmente, las emisiones de COT no quemados fueron estimadas mediante un balance de materia.

La información requerida para la estimación de la eficiencia de los quemadores incluyó, entre otros parámetros, dimensiones de cada uno de los quemadores, volumen de gas quemado, temperatura de la flama, temperatura ambiental y velocidad del viento. Esta información fue recopilada y usada para estimar las dimensiones de la flama, los efectos que causa el viento sobre la combustión, y posteriormente, la eficiencia de la combustión (Leahey *et al.*, 2001). La formulación usada para la estimación de la eficiencia de combustión (E) se basa en la relación de la cantidad estimada de energía emitida por la flama (H_f) y la cantidad de energía contenida en el gas (H):

$$E = \frac{100 H_f}{H} (\%) \quad (3)$$

La estimación de la energía emitida por la flama (H_f), se calcula como sigue:

$$H_f = S + R \quad (4)$$

en donde S es el calor sensible ganado por el aire al pasar a través de la flama, y R es el calor perdido por la flama, debido a la radiación. R se calcula como:

$$R = A_f \sigma T_f^4 \quad (5)$$

donde A_f es el área de la flama, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, y T_f es la temperatura de la flama. El valor de S (al igual que el de A_f) puede ser estimado, suponiendo que la flama se comporta como una flama difusiva, como:

$$S = \frac{C_p \rho_f V_f (T_f - T_o)}{t_f} \quad (6)$$

donde C_p es el calor específico a presión constante del aire, ρ_f es la densidad del aire evaluada a T_f , V_f es el volumen ocupado por la flama, T_o es la temperatura ambiente, y t_f es el tiempo necesario para que el aire pase a través de la flama ($t_f = x_f / U$, donde x_f es la longitud horizontal de la flama y U es la velocidad del viento). Las dimensiones de la flama (A_f , V_f y x_f) se pueden calcular empleando el modelo desarrollado por Leahey *et al.* (1987), el cual no se presenta por brevedad.

Finalmente, la información meteorológica requerida (temperatura ambiente y velocidad de viento) para el cálculo de eficiencias de combustión, se obtuvo de campos generados por interpolación espacial. Esto fue necesario, ya que la posición de las estaciones meteorológicas no coincide con la posición de las plataformas de producción donde se encuentran los quemadores (Figura 2).

Así, los campos meteorológicos fueron obtenidos mediante un modelo de diagnóstico (Goodin *et al.*, 1979) a partir de la información puntual de las estaciones meteorológicas de la zona. El modelo realiza una interpolación espacial con pesos que varían con el inverso del cuadrado de la distancia:

$$V_{int} = \frac{\hat{A}_i V_{m,i} (1/d_i^2)}{\hat{A}_i 1/d_i^2} \quad (7)$$

donde V_{int} es el valor interpolado, $V_{m,i}$ es el valor medido en la estación i , y d_i es la distancia de la estación al punto en donde se está generando el valor interpolado. El dominio seleccionado para realizar la interpolación espacial contiene 42 celdas en el eje horizontal y 56 celdas en el eje vertical, cada una de 4×4 km² (Figura 2). La esquina inferior izquierda del área establecida, se sitúa en la coordenada UTM 480,000 (m) en el eje horizontal y 2,016,000 (m) en el eje vertical, de la zona geográfica número 15. De esta forma, el modelo de diagnóstico genera valores interpolados en el centro de cada celda, los cuales son usados para el proceso de estimación de emisiones.

Resultados

Las variaciones propias del proceso de extracción de hidrocarburos del subsuelo, así como

el origen del mismo, traen como consecuencia variaciones en la composición de los gases venteados. Con el fin de simplificar el análisis, se decidió tomar una composición promedio del gas asociado quemado (Tabla 2). La eficiencia global de combustión estimada de los quemadores durante los periodos de estudio fue de 22%, lo que resultó en emisiones considerables de hidrocarburos no quemados y de H₂S no convertido a SO₂. Los quemadores menos eficientes fueron los ubicados más lejos de la zona costera, debido principalmente a la velocidad de vientos encontrados en estos sitios. Los quemadores del CPTGA, registraron una eficiencia promedio del 44%. Estos resultados son consistentes con estimaciones teóricas (Leahey *et al.*, 2001) para quemadores operando con metano, debiéndose la alta ineficiencia a las flamas relativamente cortas que se generan con la consecuente dificultad de poder disipar eficientemente calor. Estos resultados fueron obtenidos suponiendo una temperatura de flama de 1200°K (Mendoza *et al.*, 2004).

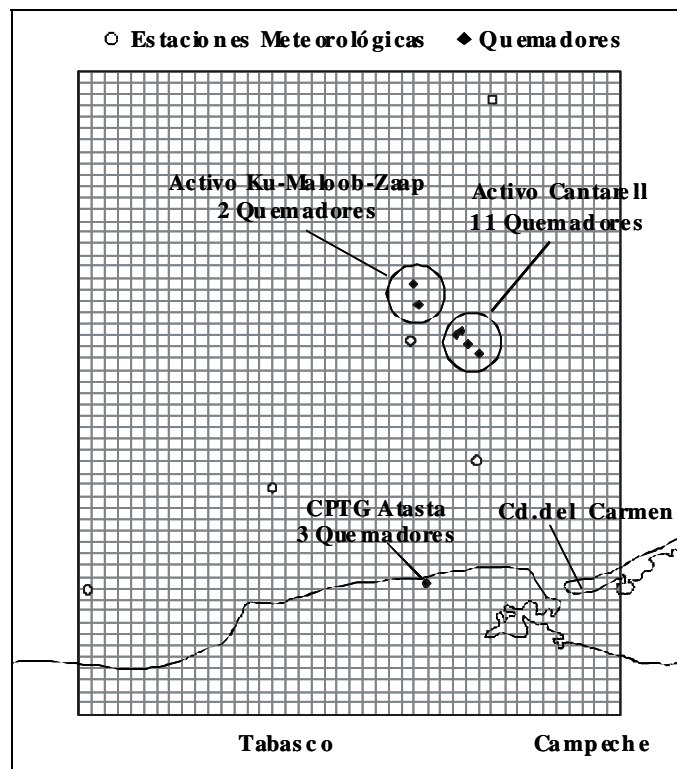


Figura 2. Detalle de la malla de interpolación y ubicación de los quemadores y estaciones meteorológicas en el área de estudio

Estimación de emisiones a la atmósfera provenientes de quemadores elevados ...

Tabla 2. Composición promedio del gas asociado venteado

Compuesto	% mol
N ₂	0.2868
CO ₂	1.7925
H ₂ S	1.3971
H ₂ O	2.6186
C ₁	64.6776
C ₂	12.7494
C ₃	7.8023
i-C ₄	1.2815
n-C ₄	2.9755
i-C ₅	1.1232
n-C ₅	1.3903
C ₆₊	1.9052

La tabla 3 presenta un resumen del volumen de gas enviado a quemadores y las emisiones estimadas producto de su combustión. En el período Invierno 2, el volumen quemado fue considerablemente mayor que en los demás periodos, por consiguiente, la carga de contaminantes fue también superior en ese mismo período. En la tabla 4 se muestra con más detalle la carga total emitida por cada quemador. En ella, se puede apreciar que los quemadores con mayor cantidad de emisiones son: AK-C2 (15%), NH-A1 (15%) y KU-A1 (19%) de los Centros de Procesos Akal-C, Nohoch-A y Ku-A, respectivamente. Los quemadores de la única instalación terrestre, CPTGA (CB-101, CB-102A y el CB-103B), sólo representan el 1.1% del total de las emisiones.

Tabla 3. Resumen de volumen quemado y emisiones generadas para cada período de estudio

Período	Volumen de gas quemado (Millones ft ³) ^a	Emisiones totales (Toneladas métricas)	Promedio diario de emisiones por quemador (Toneladas métricas)
Otoño 1	3,087	122,211	690
Otoño 2	1,626	65,042	271
Invierno 1	3,692	146,865	541
Invierno 2	6,205	240,409	1,000
Primavera	2,941	117,168	611
Verano	2,235	85,822	538

^a Volumen medido a condiciones PEMEX

Tabla 4. Emisiones totales (toneladas métricas) por quemador

Quemador	Período					
	Otoño 1	Otoño 2	Invierno 1	Invierno 2	Primavera	Verano
AK-C1	1,198	487	1,389	2,302	19,541	6,520
AK-C2	16,781	6,854	17,366	37,659	18,206	21,478
AK-C3	2,900	1,179	3,506	6,130	16,758	5,976
AK-C4	7,653	3,130	15,334	5,851	5,032	2,690
AK-J1	2,583	1,060	1,632	7,827	1,281	2,012
AK-J2	5,045	2,053	12,928	4,144	1,354	9,866
AK-J3	8,371	3,423	18,161	12,556	7,003	1,906
AK-J4	965	385	535	2,529	7,742	2,825
AK-N1	24,928	10,118	8,002	1,322	5,175	4,820

continúa...

Tabla 4. Emisiones totales (toneladas métricas) por quemador (...continuación)

Quemador	Período					
	Otoño 1	Otoño 2	Invierno 1	Invierno 2	Primavera	Verano
NH-A1	21,585	8,744	14,591	63,274	3,339	6,581
NH-A2	960	260	15,530	53,883	3,387	3,022
KU-A1	23,871	22,072	30,464	34,878	22,909	14,040
KU-H1	4,345	4,005	5,525	6,226	4,194	2,494
CB-101	191	279	383	325	237	326
CB-102A	470	583	956	1,006	568	752
CB-103B	365	409	565	497	441	514

Tabla 5. Emisión por contaminante (toneladas métricas) para cada período de estudio

Período	Contaminante						
	SO ₂	H ₂ S	NO _x	CO	PS	CO ₂	COT
Otoño 1	653	1,410	146	794	9	49,837	69,361
Otoño 2	357	736	77	418	5	27,263	36,185
Invierno 1	795	1,679	174	950	11	60,651	82,604
Invierno 2	1,209	2,889	293	1,597	19	92,236	142,166
Primavera	637	1,335	139	757	9	48,592	65,699
Verano	420	1,049	106	575	7	32,035	51,630

Finalmente, en la tabla 5 se muestra un desglose de las emisiones de cada período por contaminante. Como es de esperarse, las emisiones de CO₂ representan un porcentaje considerable del total emitido. Debido a las ineficiencias estimadas en la operación de los quemadores, las emisiones de H₂S son mayores a las de SO₂, mientras que la emisión de hidrocarburos no quemados es apreciable.

Discusión

El inventario de emisiones generado, refleja variabilidades en las emisiones de gases enviados a la atmósfera en los diferentes períodos de análisis. Esta variabilidad es resultado de tres factores fundamentales. En primer lugar, por variaciones a través del año en los volúmenes de gas quemado, debidas primordialmente a cuestiones operativas (sobrepresionamientos); otra variable involucrada, es el origen del gas, ya que éste viene asociado al petróleo crudo que se extrae en el área marina, siendo diferente la fracción de gas en cada campo de extracción, y por

ende, dependiendo de las tasas de extracción en cada campo será la cantidad de gas producido. En tercer lugar, se tiene que las variaciones meteorológicas impactan las eficiencias de los quemadores. En este último punto, resultados de otros autores (Leahey *et al.*, 2001) indican una gran sensibilidad de la eficiencia de combustión a la velocidad del viento, más que cualquier otra variable, de tal manera que velocidades por encima de 4 m/s llegan a reducir la eficiencia por debajo de un 40%. Las velocidades de viento reportadas para el período de Noviembre de 2000 a 2001 (Figura 3) superan consistentemente los 4 m/s en la zona marina (p. ej., estación Ico-1), mientras que en la zona costera las intensidades se ven disminuidas (estación Dos Bocas). Así, velocidades típicamente altas en las zonas marinas conllevan bajas eficiencias de combustión, tal como se presentó en este estudio. Estos resultados indican que un análisis posterior de los impactos de estas emisiones tiene que considerar la variabilidad encontrada al momento de generar los inventarios de emisiones en quemadores elevados.

Estimación de emisiones a la atmósfera provenientes de quemadores elevados ...

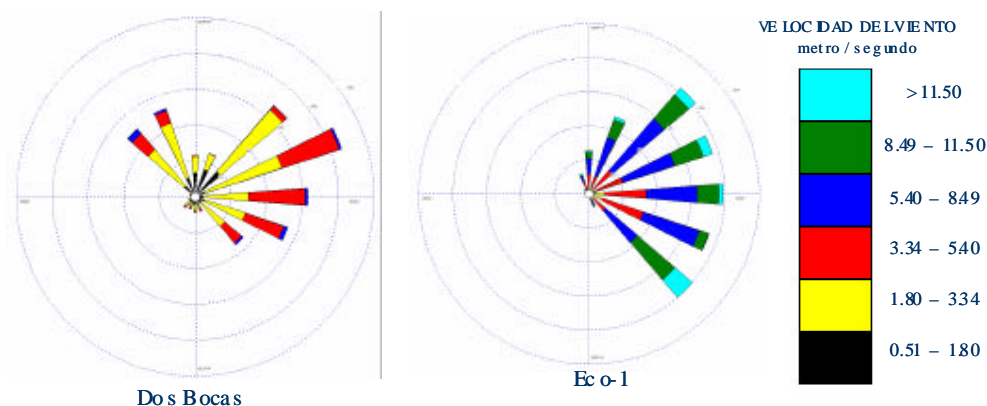


Figura 3. Rosas de viento para las estaciones meteorológicas Dos bocas y ECO-1 para el período de noviembre de 2000 a 2001

Para apreciar aún más la relevancia de la eficiencia de combustión en la estimación de las emisiones de quemadores elevados, se comparan los resultados presentados aquí con los obtenidos por Villasenor *et al.* (2003). La relación másica de SO_2 a H_2S obtenida en nuestro estudio estuvo en el rango de 0.40 a 0.49, mientras que el estudio que no factoriza el efecto de las eficiencias de combustión resulta en valores de 158, es decir, se supone una eficiencia cercana al 100%.

Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un inventario de emisiones para quemadores elevados tipo antorcha operados por PEP en la RMNE. El inventario se construyó con base a información proporcionada por PEP y factores de emisión corregidos para tomar en cuenta la eficiencia de combustión de los quemadores, debido principalmente, a las condiciones meteorológicas locales. El inventario de emisiones se realizó para seis episodios a lo largo del período comprendido entre noviembre del 2000 y noviembre del 2001, con el fin de observar variaciones estacionales. En este aspecto, se observó una gran variabilidad en cuanto a las cantidades de emisiones atmosféricas de los quemadores de la RMNE, debido principalmente a que el volumen de gas quemado depende de aspectos operacionales durante la extracción y el transporte del gas natural, así como meteorológicos que impactan la eficiencia de los quemadores (principalmente velocidad del viento). Las eficiencias de combustión estimadas para los

quemadores fueron bajas, por lo que se tienen emisiones considerables de H_2S y de hidrocarburos no quemados a la atmósfera. Estos resultados son consistentes, con lo que se puede esperar de manera teórica de la combustión de metano en quemadores tipo antorcha.

Referencias

- Bravo H.A., Saavedra M.I.R., Sánchez P.A., Torres R.J. and Granada L.M.M. (2000). Chemical Composition of Precipitation in a Mexican Maya Region. *Atmos. Environ.*, Vol. 34, No. 8, pp. 1197-1204.
- Bravo H., Soto R., Sosa R., Sánchez P., Alarcón A.L. and Ruiz J. (2004). Effects of Wet Acidic Deposition on Stony Material at the "Tajin" Archaeological Site in Veracruz, Mexico. In: Proceedings of the 97th Annual Conference of the Air & Waste Management Association, Indianapolis, IN, Paper N. 53.
- ERG (Eastern Research Group, Inc.) (1999). *Métodos para la estimación de emisiones al aire de campos de producción y operaciones de proceso de petróleo y gas*, Volumen II, Capítulo 10.
- Gamboa-Rodríguez M.T., Gamboa-Aldeco R., Abreu-Sherrer J.S., Bravo-Alvarez H. and Sosa-Echeverría R. (2004). Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in the Air of an Oil Extraction Region in the South of México. In: Proceedings of the 97th Annual Conference of the Air & Waste Management Association, Indianapolis, IN, Paper No. 470.

- matic Hydrocarbons in the Air of an Oil Extraction Region in the South of México. In: Proceedings of the 97th Annual Conference of the Air & Waste Management Association, Indianapolis, IN, Paper No. 470.
- Goodin W.R., McRae G.J. and Seinfeld J.H. (1979). A Comparison of Interpolation Methods for Sparse Data: Application to Wind and Concentration Fields. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 18, pp. 761-771.
- Leahey D.M. and Schroeder M.B. (1987). Observations and Predictions of Jet Diffusion Flame Behavior. *Atmos. Environ.*, Vol. 21, No. 4, pp. 777-784.
- Leahey D.M., Preston K. and Strosher M. (2001). Theoretical and Observational Assessments of Flare Efficiencies. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 51, No. 12, pp. 1610-1616.
- Mendoza A. y Graniel M. (2004). Modelación del transporte de emisiones generadas en quemadores elevados de instalaciones petroleras en la Sonda de Campeche. En: Memorias del XXXIV Congreso de Investigación y Extensión del Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México.
- Parungo F., Nagamoto C., Hoyt S. and Bravo H. (1990). The Investigation of Air Quality and Acid Rain Over the Gulf of Mexico. *Atmos. Environ.*, Vol. 24A, No. 1, pp. 109-123.
- PEMEX (2004). Anuario estadístico 2003: PEMEX – Exploración y Producción. www.pep.pemex.com (revisado 23-mayo-05).
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (1990). Health Assessment Document for Hydrogen Sulfide. EPA/600/8-86/026A, Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office. Research Triangle Park, NC.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (1995). Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42. 5th Edition, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- Villasenor R., Magdalena M., Quintanar A., Gallardo J.C., López M.T., Jurado R., Miranda A., Aguilar M., Melgarejo L.A., Palmerín E., Vallejo C.J. and Barchet W.R. (2003). An Air Quality Emission Inventory of Offshore Operations for the Exploration and Production of Petroleum by the Mexican Oil Industry. *Atmos. Environ.*, Vol. 37, No. 26, pp. 3713-3729.

Semblanza de los autores

Alberto Mendoza-Domínguez. Es profesor-investigador del Departamento de Ingeniería Química del ITESM Campus Monterrey y director del Centro de Tecnología Limpia del Centro de Calidad Ambiental del mismo Instituto. Obtuvo su grado de doctor en ingeniería ambiental del Georgia Institute of Technology. Sus áreas de investigación están relacionadas principalmente con modelación y monitoreo calidad del aire.

Manuel Graniel-Peralta. Obtuvo la licenciatura en ingeniería industrial en química en el Instituto Tecnológico de Mérida y el grado de maestro en ciencias del ITESM Campus Monterrey. Actualmente labora en la Gerencia de Seguridad Industrial y Protección Ambiental de PEMEX Exploración y Producción, Región Marina Noreste.