

# MÉTODO DE RESPUESTA RÁPIDA PARA EVALUACIÓN DE IMPACTOS PETROLEROS POR MEDIO DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

**AUTORES:** LUIS YÁÑEZ-TRUJILLO  
MOJENA LÓPEZ E.  
BASTIDA VILLALOBOS V.  
MARTÍNEZ MÉNDEZ L. A.  
RODRÍGUEZ CORREA M.A.  
ESPINOSA GARCÍA J.A.  
CORIA LARA Y.

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. E-mail: [emoje@yahoo.com](mailto:emoje@yahoo.com)

## RESUMEN

*Usando la Percepción Remota (PR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se evaluaron diferentes áreas contaminadas por hidrocarburos en el sureste mexicano. Para diagnosticar la magnitud de las zonas impactadas se delimitaron polígonos en el área de estudio a partir de la interpretación de mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélite LandSat TM, que constituyeron la estrategia junto con los posicionadores de satélite (GPS) que apoyaron la determinación y localización de las áreas donde se evaluó el impacto causado por los derrames de hidrocarburos. Se identificaron los tipos y el origen de los contaminantes.*

*El aporte conceptual y metodológico del trabajo contribuye a resolver los problemas de determinación de impactos de hidrocarburos de forma rápida en zonas de intensa actividad petrolera. La estrategia ayuda a decidir el tipo, intensidad y duración de las acciones de remediación y permite monitorear los cambios inducidos o naturales.*

## INTRODUCCIÓN

La detección de derrames de hidrocarburos derivados de actividades petroleras en un sitio determinado, presenta problemas inherentes a las características del terreno y a la respuesta espectral de los diversos componentes del paisaje y de los contaminantes que se pretenden localizar y cuantificar.

Para evaluar el impacto ocasionado por estos derrames de hidrocarburos, establecer los tipos y la procedencia de los contaminantes y definir la metodología óptima en un área de estudio del sureste mexicano se utilizaron las herramientas de percepción remota de acuerdo con los criterios descritos por diversos autores entre los que destacan Catena, J.G., (1995); Erakpoweri, B., (1994); Gary, A.J., (1993); Meegoda, N.J. & Prasanna R., (1995) y Sherman III & John W., (1992) que señalan que los sensores del ultravioleta (UV), el infrarrojo térmico (IRT) y las microondas tienen gran potencial para la detección del petróleo.

También encontramos investigaciones que obtuvieron resultados exitosos utilizando datos con rangos de longitud de onda visible (Vis) e infrarrojo cercano (IRc), como es el caso de Cross, A.M. (1992).

Es importante señalar que en los estudios de localización de posibles derrames de petróleo en grandes

áreas es factible utilizar las imágenes de satélite de recursos naturales disponibles en el mercado como son las imágenes Landsat TM, Spot e Ikonos, tomando en cuenta la relación de su costo por kilómetro cuadrado.

Una vez localizada el área contaminada se puede utilizar la fotogrametría a color e infrarrojo color mediante un vuelo para generar un mosaico de alta precisión que nos permita evaluar los cambios en el tiempo de manera adecuada.

La obtención de imágenes fotográficas de elevada calidad de estos territorios, es una tarea técnica compleja. Esta metodología ofrece un conjunto de criterios científico-técnico fundamentados que permiten ejecutar los levantamientos aerofotográficos, con el fin de obtener imágenes de buena calidad, para los estudios de los recursos naturales, diagnosticar el estado medioambiental y llevar a cabo la cartografía de los resultados de las investigaciones, utilizando el *software* especializado (Fig.1 y 2). Sin embargo esta parte del método retrasa unos días los resultados y a veces es un poco costoso.

Así, el grupo de investigación que realiza la presente propuesta metodológica, ya viene aplicando diversos estudios multidisciplinarios en áreas con problemas de derrames de petróleo, donde el mismo grupo ha presentado una serie de avances que muestran y proponen estrategias para la determinación de áreas contamina-

das por medio de PR y SIG. Yáñez-Trujillo, et al., (1998) y Yáñez –Trujillo, et al (2002).

Finalmente el objetivo del trabajo es mostrar una aplicación metodológica y proponer a partir de nuestra experiencia una metodología confiable que permita evaluar zonas de riesgo de contaminación y determinar su localización y dimensiones de forma rápida y precisa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. Imágenes de Satélite.

Se interpretaron imágenes de satélite LandSat TM del año 1993, para obtener una primera aproximación de las áreas contaminadas a partir del procesamiento digital de las mismas apoyándose en los algoritmos que realizan los contaminantes. Con los programas ER-Mapper, PCI y PixSat se rectificó, georeferenció y se realizaron diversos realces para mejorar el contraste en las bandas crudas de la imagen. Se produjeron varias combinaciones de bandas usando para ello la banda 6 de LandSat que es la banda térmica y (cuyo píxel es de 120 m a diferencia de las otras bandas que es de 30 m), para realizar los compuestos a color RGB y decidir cual mostraba mejor las alteraciones térmicas (Fig. 3) y de cuales nos resaltaban mejor los elementos de la escena.

En el recorte de la imagen, se determinaron algunas áreas que mostraban peculiaridades espectrales, a estas zonas se les aplicó un tratamiento digital de acuerdo con el método propuesto por Origel-Gutiérrez y Torres-Rodriguez (1997), mismas que sirvieron como una primera aproximación de las áreas contaminadas a partir del procesamiento digital por el algoritmo empleado que realiza los contaminantes (Fig. 4).

### 2. Cartografía.

Se digitalizó información cartográfica del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Para esto se utilizaron las cartas topográficas a escala 1:50,000, del área de estudio, a las que se vectorizó por medio de los programas Arc Info y el módulo Cad. de Telemap. Simultáneamente se obtuvieron fotografías de un vuelo realizado en fecha anterior, las mismas que se escanearon, se georeferenciaron y se pegaron para formar un mosaico, que posteriormente fue vectorizado utilizando los módulos de Ortho y Cad del Programa Telemap.

Posteriormente a partir de la cartografía digitalizada y del mosaico generado de las fotografías aéreas escala 1:35,000 de años anteriores se generó un mapa con coordenadas UTM para muestreo en campo.

### 3. Muestreo de Campo.

En el área de estudio, apoyados en el mapa y con GPS de alta precisión, se realizaron los muestreos de campo en donde se determinaron los tipos de contaminantes en cuanto a su cantidad y fuente.

Se detectaron diferentes áreas contaminadas por derrames de petróleo y se determinaron varios polígonos en el área de estudio a partir de la interpretación de mapas, fotografías aéreas color e infrarrojo color, ortofotos e imágenes de satélite.

La estrategia de muestreo y definición de los campos de entrenamiento fueron obtenidos mediante las imágenes de satélite y las ortofotos de los vuelos realizados, que resultaron ser las muestras de mayor importancia.

### 4. Proceso Fotogramétrico.

Ya que la obtención de imágenes fotográficas de elevada calidad de estos territorios es una tarea técnica compleja, se planearon y realizaron de un par de vuelos (época de secas y época de nortes) con cámara fotogramétrica en el área de estudio, obteniendo fotografías a color e infrarrojo color.

Una vez teniendo las fotografías del primer vuelo se realizó el escaneo con un escáner fotogramétrico Maxell, posteriormente se procesaron y pegaron para armar el mosaico con el programa Telemap y el programa Photoshop, finalizándolo con Virtuozo, de manera que se interpreto visualmente y se preparó para su posterior vectorización. (Fig. 1).

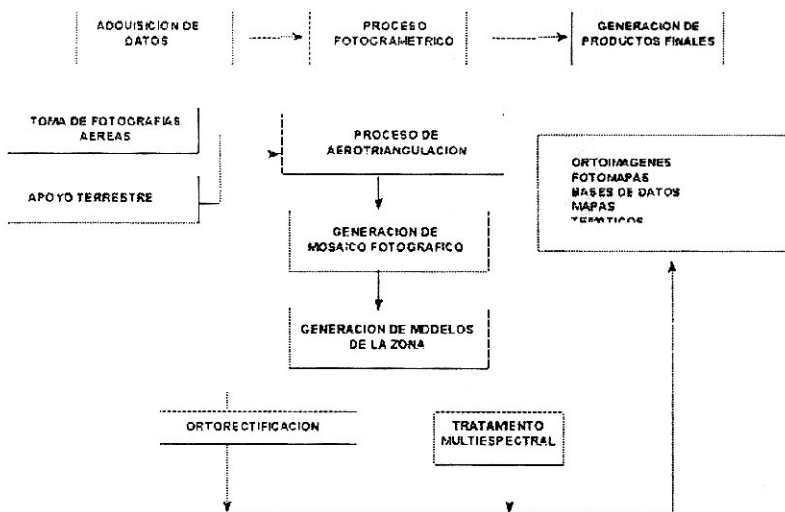


Figura 1. Creación del mosaico

Se realizó un segundo vuelo fotogramétrico, en donde las fotografías fueron escaneadas con el mismo escáner Maxell, y cargadas en el programa Virtuozo para su proceso y generación del mosaico.

Se realizó la vectorización de áreas contaminadas y en particular de los polígonos que englobaban a las manchas de petróleo que se interpretaron en los mosaicos de

los dos vuelos y se calcularon sus áreas, así como los polígonos de vegetación y suelo descubierto y se actualizo la cartografía. (Fig. 2).

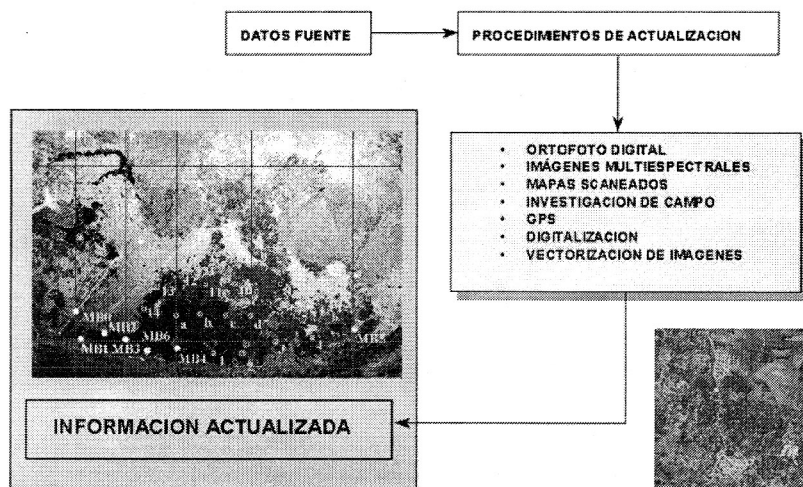


Figura 2. Proceso de actualización cartográfica.

## 5. Sistema de Información Geográfica.

La información obtenida en campo se capturo en una base de datos diseñada *exprofeso* con el programa Arc Info y migradas al programa Arc View.

Finalmente todas las capas de información fueron cargadas en el SIG Arc View, con el que se generaron una serie de mapas temáticos.

## RESULTADOS

### 1. Imágenes de Satélite.

A partir de diversos programas en el área de la imagen de satélite LandSat TM, se determinaron algunas áreas que mostraban ciertas peculiaridades de respuesta espectral, como se observa en la (Fig. 3).



Figura 3. Muestra algunas peculiaridades espectrales en la parte baja de la imagen Landsat TM.

De la imagen de satélite LandSat TM se tomaron las bandas por separado aplicándole a cada una un mejoramiento de contraste que permitieron resaltar algunas características del paisaje, después se rectificaron y georreferenciaron obteniendo así una combinación (RGB) en falso color 432, a la que se le aplicó un algoritmo de realce con el programa ER Mapper que permitió distinguir con mayor claridad las áreas contaminadas con hidrocarburos como puede apreciarse en la (Fig. 4).



Figura 4. Imagen LandSat TM con un algoritmo de realce que descubre las zonas contaminadas en la parte baja de la imagen que corresponde a un color azul oscuro.

### 2. Cartografía.

De la cartografía convencional de INEGI y en particular del mapa topográfico se obtuvieron los principales rasgos donde sobresalen los caminos y la hidrografía que sirvieron de base para diseñar el SIG, y hacer una comparación con el mosaico fotográfico, diseñando así un primer mapa que muestra las características del terreno, el cual permitió planear los muestreos y generar mapas de campo.

### 3. Muestreo de Campo.

A partir de los primeros análisis de la cartografía disponible, las ortofotos y principalmente de los resultados obtenidos de las imágenes de satélite, se establecieron los campos de entrenamiento donde se realizaron los muestreos y se tomaron las muestras analizadas por la técnica 418.1 de la EPA para la determinación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), en ellas se encontró que el 39% del total muestreado presenta una concentración menor a los 500 ppm que se establece como

aceptable, mientras que el 61% tiene un rango de concentración fluctúa entre 17 y 420,000 ppm que es considerado muy nocivo. (Tabla 2).

Muestra (ÁREA)	Profundidad (m)	TPH (ppm)	Posición geográfica (Fecha del Muestreo)
	0-0.5	35,085	
B4	1.4	5,836	N17°58'37.3 W94°30'53.0 (10/11/98)
(A)	1.9	9,007	
	2.4	2,739	
B5	0-0.5	430,936	N17°58'29.0 W94°30'52.4 (11/11/98)
(A)	1.50	8,748	
	2.50	243	
TEST 2	0-1.5	11,139	N17°58'30.9 W94°31'00.6 (11/11/98)
(A)	1.80	223	
	2.90	486	
1(A)	0.00	30,709	N17°58'22.9 W94°30'47.4 (09/11/98)
2(A)	0.45	2,551	
3(A)	1.00	83,870	
4(A)	1.72	298	
5(A)	2.15	55	
6(B)	0.50	15,540	N17°58'20.8 W94°30'50.8 (09/11/98)
7(B)	0.80	1,277	
8(B)	1.10	2,538	
9(B)	1.42	1,650	
10(B)	0.42	85,803	
11(B)	0.77	8,144	N17°58'20.8 W94°30'34.5 (09/11/98)
12(B)	0.97	4,619	

Tabla 2. Resultados de muestras colectadas.

#### 4. Proceso Fotogramétrico.

Simultáneamente a estos datos y con el apoyo de la imagen de satélite se planearon dos vuelos aerofotográficos, uno en época de secas (enero de 1998) y el otro en época de nortes (noviembre y diciembre del mismo año), (Fig. 5, 6 y 7), obteniéndose fotografías a color que fueron procesadas: primero se escanearon para tenerlas en formato digital y poder empezar a pegar los 25 modelos generando así un mosaico digital, que nos permitió tener una mejor visión de las áreas contaminadas por los derrames de petróleo (Fig. 8), y delimitando varios polígonos que fueron vectorizados. Finalmente todos los productos mencionados fueron cargados al SIG.



Figura 5. Fotografía aérea en época de secas (Enero de 1998).



Figura 6. Fotografía aérea en época de nortes (Noviembre y Diciembre de 1998).

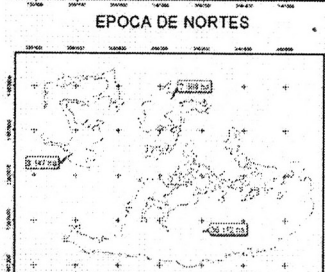
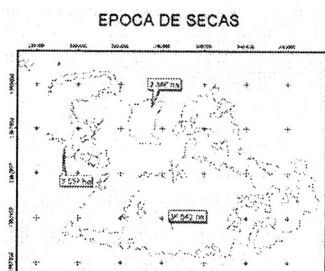


Figura 7. Polígonos de áreas y superficies en época de secas (arriba) y época de nortes (abajo)

De los mosaicos se vectorizaron las zonas con mayor contaminación para hacer una comparación de sus áreas, donde se escogieron 3 áreas, en las manchas de contaminación del primer mosaico que corresponde a la época de secas, la primera con una superficie contaminada de 3.557 ha., la segunda de 2.446 ha. y la tercera de 36.542 ha.; en el segundo mosaico correspondiente a la época de nortes, la primera superficie es de 3.347 ha, la segunda de 2.888 ha. y la tercera de 36.112 ha., (Tabla 1).

	Época de Secas	Época de Nortes	Diferencia
<b>Mancha 1</b>	3.557	3.347	-210
<b>Mancha 2</b>	2.446	2.888	+442
<b>Mancha 3</b>	36.542	36.112	-430
<b>Total</b>	42.545	42.347	-198

En las manchas de contaminación se realizaron muestreos (Fig. 8), donde obtuvimos que la media de la superficie es aproximadamente de 111,900 ppm, que la media para el nivel entre 0 y 0.5 m de profundidad es aproximadamente de 83,000 ppm y 6,700 ppm para la zona mas profunda. La desviación típica es prácticamente igual en los dos primeros estratos, lo que significa que no existe diferencia significativa en las concentraciones en los dos niveles; pero si son significativas para el estrato mayor a 1.5 m de profundidad.

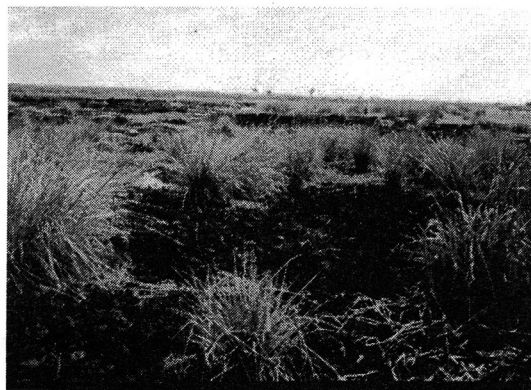


Figura 8. Se muestra la intensidad de las manchas por derrames petroleros.

#### 5. Sistema de Información Geográfica.

Los datos obtenidos se cargaron en una base de datos que comprende los recursos asociados al pantano, tanto acuáticos como terrestres donde se mencionan aspectos como: reservorios, batimetría, flora, fauna, calidad del agua, contaminantes, tipos de suelo y vegetación, la cual fue asociada a la imagen de satélite.

Finalmente se generaron varios mapas temáticos que permiten hacer una evaluación preliminar del impacto ocasionado por los hidrocarburos. (Fig. 9). Y se cargo con toda la información el SIG. Mismo que ira enriqueciéndose con el tiempo. (Fig. 10).

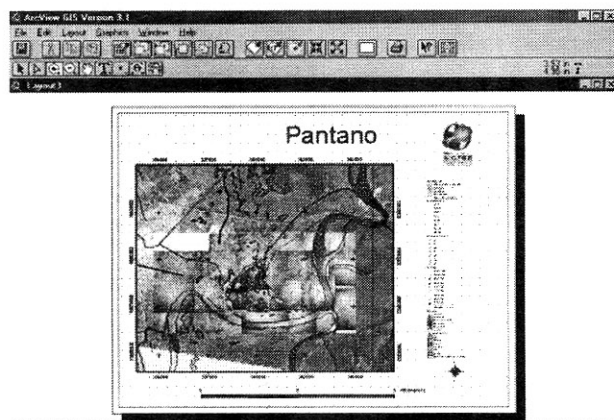


Figura 9. Muestra la imagen de satélite, el mosaico fotográfico y los puntos de muestreo en formato para impresión como mapa temático.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La contribución conceptual y metodológica de este trabajo es importante porque en él se demuestra que es posible realizar una búsqueda de derrames en zonas en donde se desconoce el problema y que los algoritmos utilizados y las combinaciones de bandas fueron las adecuadas para discriminar los hidrocarburos de otros tipos de elementos del paisaje.

La contribución informativa de la banda 6 de Landsat que es la banda térmica del sensor TM, fue de gran relevancia ya que nos permitió discriminar visualmente las áreas con fluctuaciones térmicas importantes y por lo tanto zonas de posible presencia de hidrocarburos. Lo anterior fue confirmado cuando procesamos las imágenes aéreas en el canal infrarrojo cercano. Además ahora es posible obtener mayor precisión debido a que las imágenes Landsat ETM cuentan con una resolución mayor en la banda térmica que es de 60 m.

Esto nos permitió planear vuelos fotogramétricos en áreas específicas aportando una información muy importante ya que los vuelos a color e infrarrojo color son muy adecuados para definir el tamaño y localización de las áreas contaminadas, que apoyados con los muestreos con GPS pueden muy bien determinar los cambios que se dan en el

tiempo con gran precisión como pudo constatarse en el presente trabajo en donde las diferencias en forma y tamaño de las manchas de hidrocarburos cambiaron entre las dos fechas en un promedio de .198 ha. de menos del total, sin embargo cabe aclarar que en una de las áreas

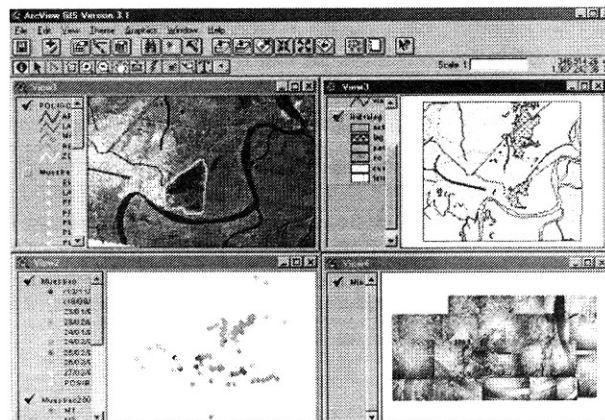


Figura 10. Muestra las vistas del SIG Arc View, para el área

se observo un incremento de .442 ha. que fue la que mostró una máxima variación. Esto es seguramente debido a la dinámica del pantano por lo que se acaba de realizar un tercer vuelo en el año 2002 para conocer mejor las tendencias del área de estudio.

Sin embargo aunque los vuelos fotogramétricos han dado resultado para el presente trabajo, nosotros consideramos que para una respuesta más rápida se requeriría de un avión ultraligero y cámaras digitales profesionales como las que usa la NASA (marca Kodak profesional). Estas son la cámara DCS 420 que capta una parte del infrarrojo cercano y medio y la cámara DCS 760 que esta siendo utilizada en la estación espacial. Este equipo sería óptimo desde nuestro punto de vista, mismo con el que ya contamos y se muestra a continuación (Fig. 11 y 12)



Figura 11. Muestra la imagen de un avión ultraligero tipo Beaver RX550.

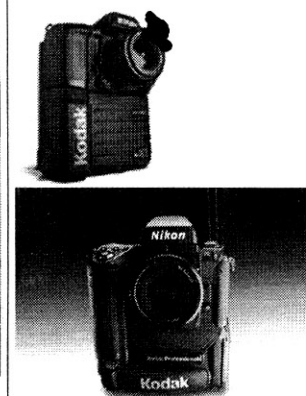


Figura 12. Muestra la imagen de las cámaras Kodak DCS 420 y DCS 760.

Consideramos que el presente trabajo también contribuye al conocimiento de la magnitud de contaminación de los hidrocarburos en las zonas con intensas actividades de petróleo, teniendo en promedio que la composición de las muestras procesadas muestran una predominancia de hidrocarburos alifáticos (39.8%), seguido de los asfálticos (32.4%), aromáticos (18.9%) y polares (9.1%). La predominancia de alifáticos hace suponer que en los sitios muestreados se vierten renovadamente hidrocarburos debido a que éstos son muy volátiles como se muestra en Yáñez-Trujillo, et al (2002).

Concluimos que es de gran utilidad el uso de las imágenes de satélite para la evaluación, monitoreo y generación de mapas temáticos, aunque las fotografías digitales aéreas son más precisas que las de satélite y nos permiten monitorear adecuadamente debido a su definición, mayor escala y detalle.

Proponemos que es de vital importancia contar con un SIG del área de estudio pues puede evaluar y cuantificar la información generando análisis de diversos tipos e incluso escenarios posibles y simulaciones. Puesto que los SIG son una herramienta adecuada para el monitoreo ambiental ya que permite crecer las bases de datos que se obtengan con el monitoreo posterior y genera un historial medio ambiental único en la zona para decidir el tipo, intensidad y duración de una solución de biorremediación.

Finalmente creemos que la metodología aquí expuesta es muy adecuada para reconocer, ubicar, cuantificar y monitorear derrames de hidrocarburos de una manera rápida y eficaz, sin embargo nosotros sugerimos que de ser posible, una mejor manera sería la utilización de un equipo ligero de monitoreo constante después de utilizar la información que nos brindan las imágenes de satélite, por esto consideramos que un avión ultraligero equipado con cámaras digitales profesionales, puede dar una mejor respuesta que utilizar un vuelo fotogramétrico tradicional que requiere de mayor presupuesto y tiempo y que si además se pudieran realizar bancos de firmas espectrales de los principales contaminantes con espectroradiómetros, redondearían la metodología.

No podríamos terminar este documento sin mencionar que esta metodología es muy adecuada para estudios de la zona costera afectada por derrames de hidrocarburos marinos y para el monitoreo de desastres.

## Bibliografía

**Catena, J.G., (1995).** «World prodigy Oil SIPI Restoration Planning». In. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference on Coastal Zone Tampa, FL, USA. ASCE pp.92-93.

**Cloutis E.A. (1989).** «Spectral reflectance of hydrocarbons. Remote Sensing implication». *Science* 224, 165-168.

**Contreras, E.F. (1986).** «La riqueza del pantano. Medio ambiente en Coatzacoalcos». *Centro de Ecodesarrollo*. 98 p.

**Cross, A.M. (1992).** «Monitoring marine oil pollution using AVHRR data: observations off the coast of Kuwait and Saudi Arabia during January 1991». In: *International Journal of Remote Sensing* vol. 13, No. 4, pp. 781-788.

**EPA. (1994).** «Federal Remediation Technologies Roundtable's Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide», EPA/542/B-94/013.

**Erakpoweri, B., (1994).** «Oil spill hazards at the upstream level, a risk management paradigm for a developing country». In: *Energy Policy* 22 (5) 393-402.

**Gallegos-Martinez M., A. Gomez, J. Zermeño, L. Yáñez-Trujillo, e. Favela and M. Gutierrez-Rojas. (1998).** *Cyperus, sp. A Potencial Phytoremediator in Tropical Marshy Zones. United States/Mexico Conference on Hazardous Waste. Tucson, Arizona August 9-11, 1998.*

**Gallegos Martínez M., A. Gómez Santos<sup>1</sup>, L. González Cruz<sup>2</sup>, M. A. Montes de Oca García<sup>3</sup>, L. Yáñez Trujillo<sup>1</sup>, J. A. Zermeño Eguía Lis<sup>3</sup> and M. Gutiérrez-Rojas<sup>4</sup>. (2000).** Diagnostic and Resulting Approaches to Restore Petroleum Contaminated Soil in a Mexican Tropical Site. In: *Water Science and Technology, Vol42, Nos 377-384, 2000.*

**Gary, A.J., (1993).** «Real-time data for oil spill prevention, response, mitigation, and litigation». In: *Proceedings of the Thirteenth Annual ESRI user conference. Palm Springs, CA. pp. 249-258.*

**Gutierrez-Rojas M., y L. Yáñez-Trujillo, (1998).** Diagnóstico de Alternativas de Remediación de Suelos Intemperizados. III Foro Técnico por una Visión Integral de la Problemática Ambiental, GEOWARE. Sept. 29-30, 1998.

**Meegoda, Namunu J. & Prasanna Ratnaweera, (1995).** «Treatment of oil-contaminated soils for identification and classification». In: *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 18, No. 1, pp. 41-49.*

**Orlov D.S. (1991).** «The use reflectance of oil-polluted soils in monitoring from remote sensing imagery». *Mapping Sciences and Remote Sensing.* 28 (4), 270-275.

**Sherman III & John W., (1992).** «Oil spill remote sensing – A Perspective». In. *Sea Technology, August-1992, pp. 10-14 y 16-17.*

**Stringer, W.J. (1992).** «Detection of petroleum spilled from the Exxon Valdez». *International Journal of Remote Sensing.* 13 (5), 799-824.

**USEPA. (1986).** «Laboratory manual physical/chemical Methods». Washington, D.C. *Test methods for evolution solid waste.* Office of solid waste and emergency response, Vol. 18. Method EPA 3540.

**Yáñez-Trujillo L., A. Montes de Oca-García, M. Gallegos-Martinez. L. A. Martínez-Méndez, V. Bastida-Villalobos, H.C. García-Jaramillo and M. Gutierrez-Rojas, (1998).** Strategies for the Determination of Oil Im-

pacts by means of Remote Sensing and Geographical Information Systems in Mexico. United States/Mexico Conference on Hazardous Waste. Tucson, Arizona August 9-11, 1998.

**Yáñez-Trujillo L., Mojena López E., Martínez Méndez L. A., Montes de Oca García A, Bastida Villalobos V, Gallegos Martínez M y Gutiérrez-Rojas M. (2002)** Estrategias para la Evaluación de Impactos Petroleros por medio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica en México. Sometido a Revisión para su publicación.

#### **ABSTRACT**

*Using the Remote Sensing (RS) and the Geographical Information Systems (GIS) in different areas were evaluated contaminated by hydrocarbons in*

*a marshy zone, neighbor to a refinery in operation, in the Mexican southeast. To diagnose the magnitude of the impacted areas polygons they were defined in the study area starting from the interpretation of maps, air pictures and satellite images LandSat TM that constituted the strategy together with the (GPS) that supported the determination and localization of the areas where the impact was evaluated, caused by the spills of hydrocarbons. The types and the origin of the pollutants were identified.*

*The conceptual and methodological contribution of the work is that contributes to solve the problems of determination of impacts of hydrocarbons in areas of intense oil activity. The strategy helps to decide the type, intensity and duration of the remediation actions and it allows monitor the induced changes or natural.*

#### **Palabras clave**

Percepción remota, PR, LandSat TM, sistemas de información geográfica, SIG, posicionadores de satélite, GPS, contaminación, hidrocarburos, algoritmos.