

## EVAPORACIÓN EN EL MEDIO AMBIENTE DE GASOLINA NORMAL (90 OCTANOS) DERRAMADA SOBRE AGUA DE MAR Y ARENA DE PLAYA

J. R. BERGUEIRO, F. DOMINGUEZ & N. MORALES<sup>1</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Gasolina, "Tray Evaporation", Parámetros meteorológicos, Aguas de mar, Arena de Playa.

**KEYWORDS:** Gasoline, "Tray Evaporation", Meteorological parameters, Sea water, Beach sand.

**RESUMEN.** En el presente trabajo se hace un estudio de la evaporación de la Gasolina Normal (90 octanos), cuando está derramada sobre agua de mar o sobre arena de playa de distinta granulometría. Las experiencias se llevan a cabo en condiciones medioambientales, determinándose las mismas a lo largo de aquella. Se analiza el efecto de la arena y de su diferente tamaño en la velocidad de evaporación. Se comparan estos datos experimentales con los que se obtienen en el laboratorio cuando se controlan las diversas variables influyentes. La función que relaciona las fracciones evaporadas y el tiempo es de tipo logarítmico en todos los casos.

**SUMMARY.** EVAPORATION INTO ENVIRONMENT OF GASOLINE (90 OCTANES) SPILT ON SEA WATER AND BEACH SAND. Evaporation of Gasoline (90 octanes) spilt on sea water and beach sand has been studied. The test were performed under natural conditions. The effect of sand size on evaporation rate was analyzed. These results were contrasted with those obtained in the laboratory. The function relating the evaporated fractions and time is logarithmic in all cases.

**RESUM.** EVAPORACIÓ EN EL MEDI AMBIENT DE GASOLINA NORMAL (90 OCTANES) ESCAMPADA DAMUNT AIGUA DE LA MAR I ARENA DE PLATJA. Es fa un estudi de l'evaporació de la gasolina normal (90 octans) en esser escampada damunt aigua de la mar o damunt arena de platja de diferent granulometria. Les experiències s'han duit a terme en condicions mediambientals. S'a-

---

<sup>1</sup> Departamento de Química. Facultad de Ciencias. Universitat de les Illes Balears. Carretera de Valldemosa, km 7.5. Palma de Mallorca.

nalitza l'efecte de l'arena i de la seva grossària en la velocitat d'evaporació. Les dades experimentals són comparades amb les obtingudes al laboratori quan es controlen les diferents variables que incideixen. La funció que relaciona les fraccions evaporades amb el temps és sempre de tipus logarítmic.

## INTRODUCCIÓN

Un crudo de petróleo o un producto derivado como la gasolina puede llegar al mar o a las playas de múltiples formas y contaminarlas: operaciones de carga y descarga de barcos, lastrado y accidentes de los mismos, accidentes en transportes en tierra, etc. De todos los fenómenos que afectan a estas mezclas de hidrocarburos derramadas el más importante es la evaporación, y principalmente en el caso de las gasolinas por la elevada volatilidad de éstas. De esta forma volúmenes elevados de hidrocarburos se transfieren a la atmósfera en un corto período de tiempo pudiendo hacer aquella irrespirable e inflamable.

En el proceso de evaporación influyen una serie de variables como el tipo de compuesto, sus propiedades físicas y químicas, la cantidad derramada, la velocidad de esparcimiento, el poder de penetración en la arena, el tamaño de ésta así como de los valores de las variables meteorológicas (velocidad y temperatura del aire, radiación solar, etc) en la zona del derrame.

El estudio de la evaporación de los hidrocarburos puede efectuarse tanto en el laboratorio como en el medio ambiente. En aquél es posible controlar todas las variables influyentes y obtener resultados repetitivos para la masa evaporada en función del tiempo con cada grupo de variables tal y como muestran varios autores: MACKAY & MATSUGU (1973), STIVER & MACKAY (1984), DOMINGUEZ & BERGUEIRO (1988a, 1988b, 1988c), BERGUEIRO *et al.*, (1989), DOMINGUEZ & BERGUEIRO (1990). Factores como la velocidad de esparcimiento de los hidrocarburos, su poder de penetración en el subsuelo así como la capacidad de retención de aquellos por el mismo, en función de su granulometría, se han estudiado en trabajos precedentes, BERGUEIRO *et al.* (1989), DOMINGUEZ & BERGUEIRO (1990).

Igualmente el estudio de la evaporación puede efectuarse en condiciones de medio ambiente; pero en este caso no es posible el control de variables como velocidad y temperatura del aire, temperatura de la mezcla, radiación solar, etc; en este tipo de estudio únicamente es posible registrar o anotar los valores instantáneos de estas variables siendo mucho más complejo el estable-

cimiento de relaciones cuantitativas para la velocidad de evaporación (masa evaporada frente al tiempo) en estas condiciones. Algunos autores (YANG & WANG, 1978) estudian diversos aspectos de la evaporación, desarrollando modelos matemáticos que describen los procesos de evaporación de hidrocarburos derramados en el mar. Dada la complejidad de un crudo de petróleo, sustituyen éste por un conjunto de fracciones individuales distintas entre sí, de las que se pueden conocer sus características físicas y químicas. Finalmente, contrastan su modelo matemático, que describe el comportamiento de estas mezclas, con crudos de Nigeria y Venezuela y con fuel-oil n° 2. El modelo que desarrollan estos autores no considera la formación de una película de hidrocarburos, de viscosidad elevada, en la superficie del derrame a las cinco horas de comenzada la evaporación. Como consecuencia de esto las predicciones que efectúa el modelo solamente son válidas en las primeras etapas del proceso. Para tiempos inferiores a la formación de la película, el coeficiente de transferencia de materia (m/s) lo calculan mediante la siguiente ecuación:

$$K = 69 \cdot A^{-0,055} \cdot e^{0,42} \cdot U$$

donde:

- K = coeficiente de transferencia de materia, m/s.
- A = área de transferencia, m<sup>2</sup>.
- U = velocidad del aire, m/s.

Estos autores consideran igualmente que la influencia de la temperatura en la evaporación es significativa en las primeras etapas del proceso, mientras que la velocidad del aire lo es durante todo él.

SIVADIER & MOKOLAJ (1973) estudian el efecto del oleaje en la velocidad de evaporación de los hidrocarburos y deducen, que aunque la película de hidrocarburos formada por el derrame amortigua la intensidad del oleaje en proporción directa a la viscosidad de éstos, el oleaje incrementa notablemente la velocidad de la evaporación, hasta unas tres veces.

La ecuación general del proceso de evaporación es:  $dN/dt = K \cdot \delta C$ , donde:

- $dN/dt$ : flujo general que se evapora por unidad de superficie y de tiempo.
- $\delta C$ : gradiente de concentración de volátiles entre el seno de la masa que se evapora y la atmósfera, siendo esta última normalmente muy próxima a cero.
- K: coeficiente de transferencia para el proceso cuyas unidades dependen de las de la concentración.

Este coeficiente debe incluir la dependencia de la velocidad de evaporación con el resto de las variables (velocidad del aire, temperatura, difusividad, viscosidad, volatilidad de los hidrocarburos, etc.). Diversos autores han propuesto ecuaciones que relacionan este coeficiente de transferencia con las distintas variables. Para unos, el coeficiente de transferencia es una función potencial de la velocidad del aire, así SUTTON (1953 y 1955) propone 0,5 como exponente de la velocidad del aire mientras que MACKAY & MATSUGU (1973) proponen un exponente igual a 0,78. Según YANG & WANG (1978), el coeficiente de transferencia es un función exponencial de la velocidad del aire ( $u$ ), de la forma:  $K = \alpha e^{q \cdot u}$ , donde  $K$  es el coeficiente de transferencia de materia,  $q$  un parámetro empírico cuyo valor está comprendido entre 0,39 y 0,42, y  $\alpha$  la constante de proporcionalidad, función del área de transferencia de materia.

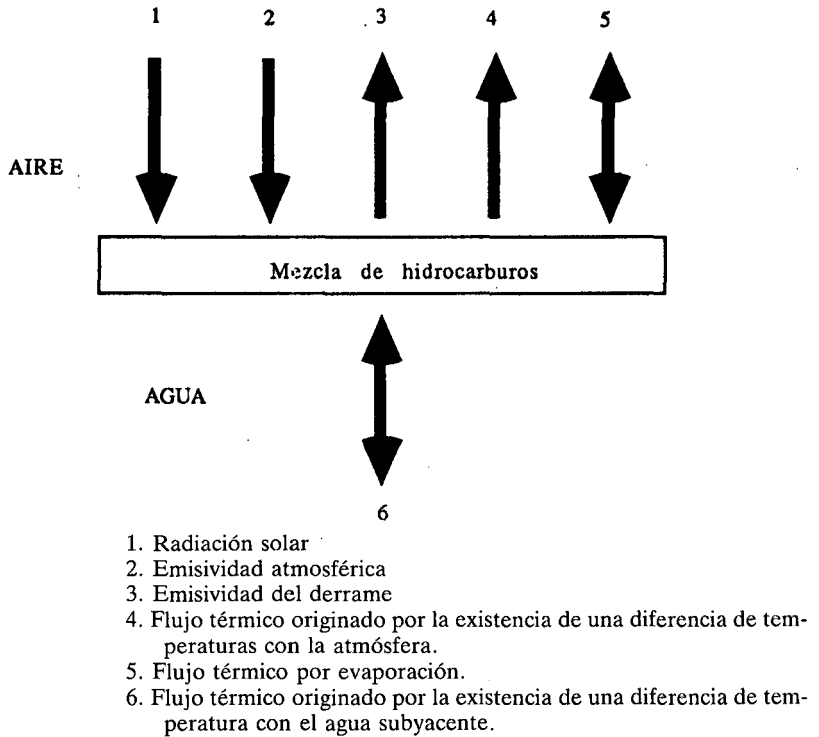


Fig. 1.- Flujos térmicos en un derrame (MACKAY y MATSUGU, 1973).

Energy budget terms for an evaporating spill.

La temperatura de la mezcla de hidrocarburos determina la presión de vapor de la mezcla de hidrocarburos al igual que su viscosidad y difusividad por lo que se trata de una variable fundamental. La temperatura de la mezcla que se evapora libremente es la resultante de un conjunto de flujos térmicos, que se señalan en la figura 1.

La temperatura de la mezcla puede mantenerse constante cuando la experiencia se realiza en el laboratorio estableciendo un sistema termostático adecuado que compense rápidamente los flujos térmicos del esquema anterior, sin embargo esto no es posible cuando se opera en el medio ambiente. MAC-KAY & MATSUGU (1973) proponen una ecuación diferencial para el cálculo instantáneo de la temperatura de la mezcla en la que intervienen las radiaciones solar directa y difusa, la emisividad de la atmósfera, las capacidades caloríficas del líquido y del vapor, las entalpías de vaporización, presiones de vapor; difusividad, densidad, viscosidad, etc. Teniendo en cuenta que la práctica totalidad de las variables cambian durante el proceso de la evaporación, la integración de esta ecuación es inabordable por métodos analíticos, siendo únicamente posible efectuar aproximaciones numéricas parciales a la misma.

## MATERIAL Y METODOS

El procedimiento seguido para la determinación de la velocidad de evaporación de la gasolina normal (90 octanos) es el descrito en la bibliografía como "Tray Evaporation" por STIVER & MACKAY (1984), DOMINGUEZ & BERGUEIRO (1988c). Este procedimiento consiste en efectuar la evaporación de la gasolina depositada en una placa circular de área conocida y que se coloca a la intemperie en lugar de en un tunel de viento como se hace en su diseño original. A intervalos determinados de tiempo se efectúa la pesada de la placa y por diferencia se determina la cantidad evaporada en ese intervalo y en el total del proceso. En unas experiencias, la placa en la que se deposita la gasolina contiene agua de mar y, en otras, arena de playa de diferentes tamaños de grano.

El área interna de las placas en las que se efectúa la evaporación es en todas las experiencias de  $73,442 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . En todos los casos se depositan 30 g de gasolina recientemente adquirida. En las experiencias con arena de playa se colocan previamente 140 g de arena. Los distintos tipos de arena se obtienen de la forma siguiente: la arena *normal* es la arena seca directamente reco-

gida de la playa de la que se eliminan conchas y guijarros. Las fracciones *media* y *gruesa* se obtienen a partir de la normal por tamizado de la misma y descartando la fracción muy gruesa ( $D > 1 \text{ mm}$ ) y la fracción polvorienta ( $D < 0,25 \text{ mm}$ ), de forma que se denomina fracción *media* aquella cuyo tamaño (diámetro,  $D$ ) está comprendido entre 0,25 y 0,5 mm, mientras que para la fracción *gruesa* el tamaño se encuentra entre 0,5 y 1 mm.

La velocidad y temperatura del aire se determinan en el mismo lugar en el que se colocan las placas, junto a ellas a la misma altura y lejos de obstáculos que produzcan interferencias. Para la determinación de la velocidad del aire se utiliza un anemómetro SEAC modelo AM-7 (resolución 0,1 m/s y precisión  $\pm 2\%$ ) que efectúa una determinación cada 10 segundos. La medida se efectúa por medio de cortés de un haz de luz infrarroja, de tal manera que por cada vuelta de las cazoletas, el sensor origina 10 impulsos. La temperatura se determina mediante un termómetro digital CRISON Mod. 621 dotado de 6 sondas.

La temperatura de la mezcla en evaporación situada en las placas se determina en otra placa testigo que contiene una mezcla idéntica a aquella en la que se toman datos de pérdida de peso y situada junto a ella y en las mismas condiciones. En dicha placa testigo se introduce la terminal del termómetro de forma que no toque el fondo, paredes o quede en el aire.

La radiación solar total recibida por las muestras se determinó a partir de las representaciones gráficas suministradas por el Servicio Meteorológico Zonal de Baleares. La radiación solar total se determina mediante un sensor de marca KIPZONEN acoplado a un registrador marca LINAX 2M3. Las áreas de los picos trazadas por el registrador anterior correspondientes a cada intervalo de tiempo se calculan mediante un sistema de análisis de imagen morfo-métrico marca AMS modelo VIDS III. Se trata de un sistema de análisis de imagen semiautomático de alta resolución que utiliza una cámara de televisión que da imágenes directas de la muestra visualizada con lente macro.

Las experiencias se realizan a partir de las 8,30 UTM.

Las placas se sitúan a la intemperie y a cortos intervalos de tiempo se pesan para determinar la fracción evaporada en peso ( $F_m$ ); igualmente se registra la temperatura ambiente durante ese intervalo, la temperatura de la gasolina, la velocidad del aire y la radiación solar total recibida por las placas en ese intervalo.

## RESULTADOS Y DISCUSION

En la tabla 1 se muestran la temperatura y velocidad del aire al igual que la radiación solar directa recibida por la muestra en evaporación en cada intervalo de tiempo t. La velocidad del aire es en toda la experiencia próxima a 1 m/s, tomando como valores máximos y mínimo 1,35 y 0,47 m/s. Dado el período del día en el que fueron realizadas las experiencias tanto la energía recibida por la mezcla como la temperatura del aire se incrementan en el transcurso de aquella.

PARAMETROS METEOROLOGICOS			
Tiempo evapor. (min)	Temperatura media aire (°C)	Velocidad media aire (m/s)	Radiación (J) en intervalo (min) en placa (S=73,44cm <sup>2</sup> )
5	20,4	0,91	57,9876
10	20,7	1,29	53,2451
15	21,0	0,64	64,5101
20	21,4	0,67	68,8230
25	21,6	0,62	79,4575
30	21,9	1,08	61,6757
35	22,2	0,66	68,3211
40	22,5	0,65	70,2281
45	22,8	0,61	75,7238
50	23,1	1,06	79,7330
55	23,5	1,11	76,9901
60	23,9	1,02	70,7136
65	24,2	1,03	74,5330
70	24,5	0,47	78,1564
75	24,7	0,90	84,5330
80	24,9	0,97	78,8921
85	25,1	1,10	81,3647
90	25,4	0,59	78,4917
95	25,7	1,25	87,0136
100	25,9	1,01	89,7195
105	26,1	1,38	86,7096
110	26,3	0,95	91,0184
115	26,5	0,47	91,1927
120	26,7	0,53	102,6776
125	26,9	0,75	103,0525
130	26,9	0,99	95,6441
135	27,0	0,78	78,8471
140	27,0	0,55	87,3169
145	27,0	0,68	96,6368
150	27,0	0,57	91,7896
155	27,0	0,86	103,2876
160	27,1	1,19	102,6507
165	27,1	1,35	102,0191
170	27,2	1,00	101,3929
175	27,2	0,86	100,7613
180	27,2	0,49	16,3725
185	27,0	0,95	25,1876
190	27,0	1,21	94,4563
195	27,0	0,92	95,0879
200	26,9	0,95	95,0771

Tabla 1. Valores de los parámetros meteorológicos durante las experiencias.

Meteorological parameters data through the experiments.

En la tabla 2 se muestran los valores de la fracción evaporada en el transcurso de la evaporación de gasolina sobre agua. Igualmente se expresa el cociente de la temperatura de la muestra a la temperatura del aire a lo largo de la experiencia. Las tablas 3, 4 y 5 muestran los mismos parámetros pero correspondientes a la evaporación de la gasolina derramada sobre arena media, normal y gruesa respectivamente.

Las fracciones evaporadas se ajustan en todas las experiencias a una función del tiempo mediante la ecuación:

$$F_m(t) = a \cdot \ln(1 + b \cdot t) [1]$$

siendo  $t$  el tiempo total de evaporación y  $a$  y  $b$  los parámetros a determinar en el ajuste. Este ajuste se efectúa mediante el algoritmo descrito por MARQUARDT (1963).

Tiempo (min)	Velocidad aire (m/s)	$\frac{T_{\text{placa}}}{T_{\text{aire}}}$	$F_m$ (%)
5	0,91	0,63	26,70
10	1,29	0,58	38,98
15	0,64	0,54	49,45
20	0,67	0,52	57,06
25	0,62	0,49	62,03
30	1,08	0,49	66,67
35	0,66	0,51	70,07
40	0,65	0,56	73,21
45	0,81	0,60	75,81
50	1,06	0,65	78,18
55	1,11	0,67	80,19
60	1,02	0,68	82,34
65	1,03	0,70	83,96
70	0,47	0,71	85,25

Tabla 2. Valores de la fracción evaporada en peso,  $F_m$ , (%) en la evaporación de la Gasolina de 90 octanos derramada sobre agua.

Masic fraction evaporated,  $F_m$ , (%) due to evaporation of 90 octanes gasoline spilt on water.

La ecuación anterior es similar a la desarrollada por STIVER & MACKAY (1984) para el estudio de la evaporación de mezclas de hidrocarburos. Los parámetros  $a$  y  $b$  están relacionados con la volatilidad de la mezcla (tempera-



turas de destilación), temperatura de experiencia, entalpía de vaporización, área de transferencia y coeficiente de transferencia que depende a su vez de las propiedades de la mezcla que se evapora; pero para la gasolina, dada su elevada volatilidad, ese tiempo debe garantizar que todavía existe suficiente gasolina como para que el área de transferencia permanezca invariable, concretamente hasta una  $F_m$  igual al 80 u 85% como máximo.

En la tabla 6 se muestran los valores de los parámetros de ajuste a y b de la ecuación [1] para las fracciones evaporadas que se muestran en las tablas 2 a 5.

Tiempo (min)	Velocidad aire (m/s)	$T^{ra}$ placa/ $T^{ra}$ aire	$F_m$ (%)
5	0,91	0,82	7,56
10	1,29	0,80	16,47
15	0,64	0,77	25,03
20	0,67	0,74	30,97
25	0,62	0,71	38,51
30	1,08	0,71	44,02
35	0,66	0,72	48,75
40	0,65	0,75	52,09
45	0,81	0,75	55,63
50	1,06	0,77	58,73
55	1,11	0,77	61,63
60	1,02	0,77	64,23
65	1,03	0,78	66,24
70	0,47	0,78	68,18
75	0,90	0,80	69,92
80	0,97	0,82	71,19
85	1,10	0,83	72,51
90	0,69	0,84	73,72
95	1,25	0,85	74,49
100	1,01	0,87	75,32
110	0,95	0,87	77,03
120	0,53	0,87	78,46
130	0,99	0,88	79,69
140	0,55	0,90	80,62
150	0,57	0,91	81,75
160	1,19	0,92	82,54
170	1,00	0,93	83,19
180	0,49	0,94	83,76
190	1,21	0,95	84,31
200	0,95	0,95	84,82

Tabla 3. Valores de la Fracción evaporada en peso,  $F_m$ , (%) en la evaporación de la Gasolina de 90 octanos derramada sobre arena media ( $0.25 < D < 0.5$  mm).

Masic fraction evaporated,  $F_m$ , (%) due to evaporation of 90 octanes gasolina spilt on medium-sized sand ( $0.25 < D < 0.5$  mm).

A la vista de los resultados anteriores se observa que la evaporación de la gasolina de 90 octanos en el medio ambiente transcurre de forma semejante a la que se produce cuando dicha evaporación se efectúa en el laboratorio con todas las variables influyentes bajo control, puesto que los valores de fracción evaporada en masa se ajustan en todos los casos a una fracción del tiempo del tipo de la ecuación [1]. Los parámetros de ajuste para una misma mezcla dependen de las condiciones experimentales según demuestran STIVER & MACKAY (1984).

Tiempo (min)	Velocidad aire (m/s)	$\frac{T^{ra} \text{ placa}}{T^{ra} \text{ aire}}$	Fm (%)
5	0,91	0,81	12,21
10	1,29	0,79	20,02
15	0,64	0,76	27,72
20	0,67	0,72	35,66
25	0,62	0,69	42,13
30	1,08	0,70	47,23
35	0,66	0,71	51,63
40	0,65	0,73	55,21
45	0,81	0,74	59,71
50	1,06	0,77	61,32
55	1,11	0,77	63,72
60	1,02	0,77	65,79
65	1,03	0,78	67,53
70	0,47	0,78	69,24
75	0,90	0,80	70,69
80	0,97	0,82	72,11
85	1,10	0,83	73,52
90	0,69	0,84	74,49
95	1,25	0,85	75,51
100	1,01	0,86	76,48
110	0,95	0,87	78,04
120	0,53	0,87	79,38
130	0,99	0,88	80,68
140	0,55	0,90	81,74
150	0,57	0,91	83,62
160	1,19	0,92	83,90
170	1,00	0,93	84,72
180	0,49	0,94	85,04
190	1,21	0,95	85,58
200	0,95	0,95	86,06

Tabla 4. Valores de la Fracción evaporada en peso, Fm, (%) en la evaporación de Gasolina de 90 octanos derramada sobre arena normal.

Masic fraction evaporated, Fm, (%) due to evaporation of 90 octanes gasoline spilt on normal sand.

Según han comprobado DOMINGUEZ & BERGUEIRO (1988a, 1988b y 1988c), en experiencias de evaporación efectuadas en el laboratorio, los valores concretos de estos parámetros a y b son tales que las fracciones evaporadas para un mismo tiempo se incrementan al aumentar la velocidad del aire o la temperatura. Los valores obtenidos en las experiencias reflejadas en el presente artículo son bastante aproximados a los obtenidos en el laboratorio a condiciones experimentales semejantes. Así cuando la velocidad del aire se fija en 1 m/s, a los 45 minutos se alcanza un 70,97% a 15°C, un 79,08% a 20°C y un 80,14% a 25°C. Si la velocidad del aire se fija en 0,5 m/s a los 45 minutos los respectivos porcentajes de evaporación son 70,53%, 73,33% y 75,39. En las condiciones experimentales reflejadas en el presente trabajo, a los 45 minutos el porcentaje de evaporación es de 75,81%.

Tiempo (min)	Velocidad aire (m/s)	$T^{ra}$ placa/ $T^{ra}$ aire	Fm (%)
5	0,91	0,80	15,07
10	1,29	0,77	24,23
15	0,64	0,75	33,01
20	0,67	0,71	41,16
25	0,62	0,68	47,51
30	1,08	0,69	52,47
35	0,66	0,70	56,61
40	0,65	0,72	59,51
45	0,81	0,74	62,02
50	1,06	0,76	64,53
55	1,11	0,77	66,61
60	1,02	0,77	68,52
65	1,03	0,78	70,49
70	0,47	0,78	71,96
75	0,90	0,80	73,26
80	0,97	0,82	75,20
85	1,10	0,83	76,21
90	0,69	0,84	77,43
95	1,25	0,85	78,20
100	1,01	0,87	79,41
110	0,95	0,87	80,52
120	0,53	0,87	81,68
130	0,99	0,88	83,22
140	0,55	0,90	83,98
150	0,57	0,91	85,04
160	1,19	0,92	86,03
170	1,00	0,93	86,88
180	0,49	0,94	87,52
190	1,21	0,95	88,07
200	0,95	0,95	88,56

Tabla 5. Valores de la Fracción evaporada en peso, Fm, (%) en la evaporación de la Gasolina de 90 octanos derramada sobre arena gruesa ( $0.5 < D < 1.0$  mm):

Masic fraction evaporated, Fm, (%) due to the evaporation of 90 octanes gasolina spilt on coarse sand ( $0.5 < D < 1.0$  mm).

Si consideramos como 100 la fracción evaporada de la gasolina normal que no está derramada sobre arena de playa al cabo de 60 minutos, solamente se habrá evaporado un 78,01% de gasolina cuando ésta está derramada sobre arena media, un 79,90% cuando está derramada sobre arena normal y un 83,22% cuando está derramada sobre arena gruesa.

La evaporación de la gasolina en presencia de arena transcurre más lentamente que sobre agua. La arena que provoca un mayor descenso en la velocidad de evaporación es la denominada fracción *gruesa*. Este hecho sucede de igual forma cuando la evaporación se lleva a cabo en condiciones de laboratorio según demuestran BERGUEIRO *et al.* (1989) y DOMINGUEZ & BERGUEIRO (1990) para esta gasolina y otras mezclas de hidrocarburos. Igualmente este resultado es coherente con la fracción de huecos que presentan los distintos tipos de arena (*gruesa* > *normal* > *media*) y con la superficie externa total de cada tipo de arena (*media* > *normal* > *gruesa*).

Las temperaturas de la mezcla en las placas son superiores cuando la evaporación se realiza en arena que sobre agua por las distintas capacidades caloríficas de los sistemas agua-gasolina y arena-gasolina que se forman; pero, sobre todo, por la menor velocidad a la que transcurre la evaporación en el sistema arena-gasolina. Durante el transcurso de la experiencia se produce primeramente una disminución de la temperatura de la mezcla como consecuencia de la intensa evaporación que se produce en esos instantes, siendo la masa remanente la que cede la correspondiente energía de vaporización a los hidrocarburos que se evaporan a costa de su energía interna y siendo ésta mayor a la recibida del Sol en los mismos instantes. Conforme transcurre la experiencia las fracciones que sucesivamente se evaporan son menores y como consecuencia también lo son las entalpías de vaporización necesarias, de forma que la energía recibida es más que suficiente para compensar esas entalpías y por lo tanto se eleva la temperatura de la mezcla remanente en la placa.

	Gasolina sobre agua	Gasolina ar.media	Gasolina ar.normal	Gasolina ar.gruesa
a	23,9012	26,8233	24,8796	23,1542
b	0,4762	0,1421	0,1906	0,2738

Tabla 6. Valores de los parámetros *a* y *b* obtenidos en el ajuste de los resultados experimentales de las tablas 2, 3, 4 y 5 mediante ecuación  $F_m = a \cdot \ln(1+bt)$ .

Values of parameters *a* and *b* obtained when fitting of experimental results in tables 2, 3, 4 and 5 by means of the equation:  $F_m = 1 \cdot \ln(1+bt)$ .

## CONCLUSIONES

La influencia de la presencia de arena en la velocidad de evaporación se muestra en la figura 2, que representa la fracción evaporada  $F_m$  (%) frente al tiempo (min). La figura 3 muestra la variación de  $F_m$  (%) frente al tiempo (min) para los tres tipos de arena balnear con la que se realizaron estas experiencias. De estos valores se deduce la gran influencia de la presencia de arena sobre el proceso, ya que para conseguir el mismo porcentaje de evaporación que cuando está sola se necesita un tiempo casi dos veces y media superior. Cuando se compara la evaporación de la gasolina derramada sobre los tres tipos de arena se comprueba que no existe una variación significativa en la velocidad de evaporación con el tamaño de grano. Las pequeñas diferencias están motivadas por la distinta difusividad de los componentes de la gasolina a través de los canales existentes en la arena y no a una variación en el área de transferencia, como podría pensarse *a priori*, ya que ésta permanece constante y no depende del tamaño de grano.

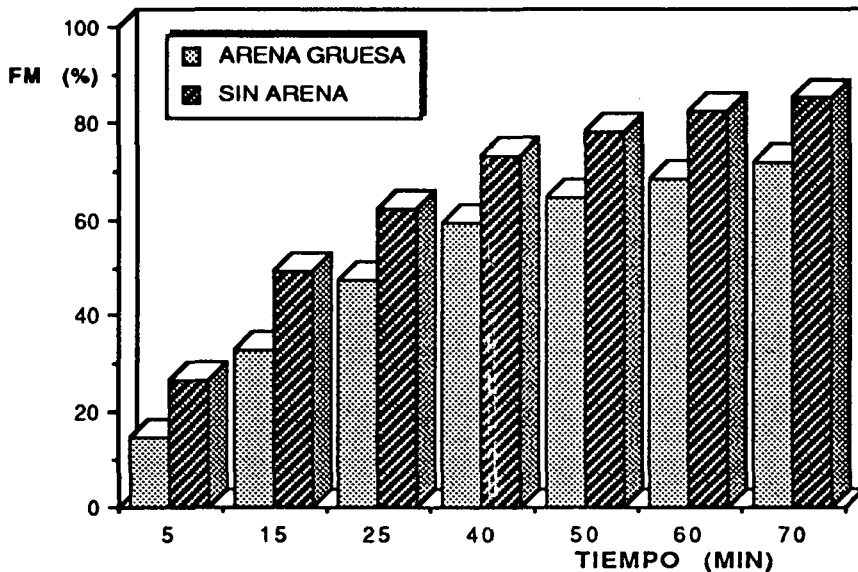


Fig. 2.- Fracción másica evaporada de gasolina de 90 Octanos cuando está derramada sobre agua y sobre arena gruesa.

Masic fraction evaporated,  $F_m$  (%) due to evaporation of 90 octanes gasoline spilt on water and coarse sand.

Los resultados obtenidos cuando se trabaja en condiciones de medio ambiente, con mayor número de variables no controladas, son comparables a los que se obtienen en el laboratorio con tratamiento aislado de las diferentes variables y pueden interpretarse de igual forma, puesto que en todos los casos se llega a una función temporal de similares características para expresar la fracción evaporada respecto del tiempo. Sin embargo, encontrar una expresión que relacione el coeficiente de transferencia con el conjunto de variables medioambientales influyentes es un proceso más complejo que las pretensiones de este trabajo, puesto que requiere de un complejo tratamiento matemático de los mismos.

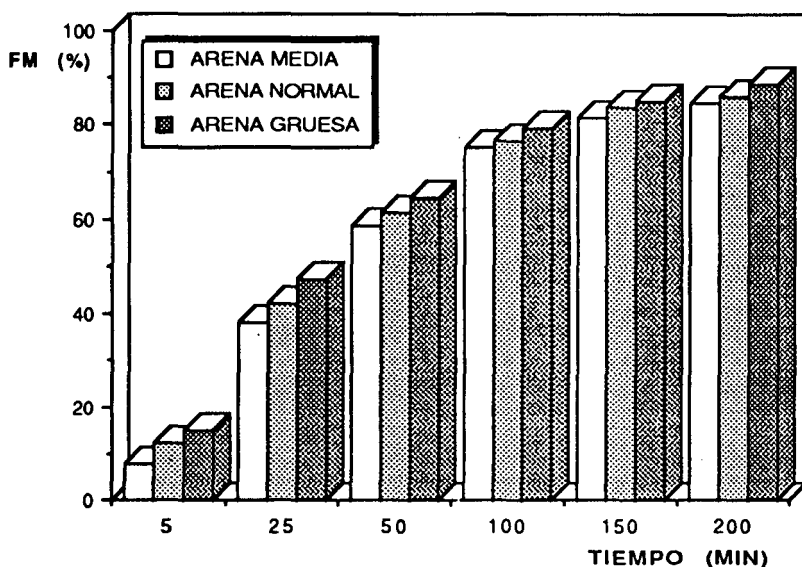


Fig. 3.- Fracción másica evaporada de gasolina de 90 Octanos cuando está derramada sobre arena de tres tamaños (media, normal y gruesa).

Masic fraction evaporated,  $F_m$  (%) due to evaporation of 90 octanes gasoline spilt on normal, medium and coarse sand.

#### BIBLIOGRAFÍA

- BERGUEIRO, J.R.; DOMÍNGUEZ, F.; PONS, J.M. & MARTÍ, A. 1989.- Research on the evaporation of gasoline on beach sand. *Spill Techn. Newsletter*, 14(2): 10-15.
- DOMÍNGUEZ, F. & BERGUEIRO, J.R. 1988a.- Evaluación de los efectos de derrames de hidrocarburos. Parte I: Aspectos Teóricos. *Ing. Química*, 230: 63-73.
- DOMÍNGUEZ, F. & BERGUEIRO, J.R. 1988b.- Evaluación de los efectos de derrames de hidrocarburos. Parte II: Método de Gas Stripping. *Ing. Química*, 231: 81-89.

- DOMÍNGUEZ, F. & BERGUEIRO, J.R. 1988c.- Evaluación de los efectos de derrames de hidrocarburos. Parte III: Método de "Tray Evaporation". *Ing. Química*, 232: 151-162.
- DOMÍNGUEZ, F. & BERGUEIRO, J.R. 1990.- Evaluación de los efectos de derrames de hidrocarburos. Parte IV: Evaporación sobre arena de playa. *Ing. Química*, 257: 133-138.
- MACKAY, D. & MATSUGU, R.S. 1973.- Evaporation Rate of Liquid Hydrocarbon spills on Land and Water. *Can. J. Chem. Eng.*, 51: 434-439.
- MARQUARDT, D.M. 1963.- An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-Linear Parameters. *Jour. Soc. Indus. APTL. NATH.*, 11: 431-441.
- SIVADIER, H.O. & MOKOLAJ, P.G. 1973. *Measurements of Evaporation Rates from Oil Slicks on the open Sea*. Sym. Preven. & Control of Oil Spills. API (Washington). 475 pp.
- STIVER, W. & MACKAY, D. 1984.- Evaporation Rate of Spills of Hydrocarbons and Petroleum Mixtures. *Environ. Sci. Technol.*, 18(11): 834-840.
- SUTTON, O.G. 1953.- *Micrometeorology*. McGraw Hill. New York.
- SUTTON, O.G. 1955.- *Atmospheric Turbulence*. Methuen and Co. Ltd.
- YANG, W.C. & WANG, H. 1978.- Modeling of Oil Evaporation in Aqueous Environment. *Water Research*, 11: 879-887.