

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FRANCISCO RAÚL MEDINA SERRANO  
CUENTA: 401111909**

**“INVENTARIO DE GASES INVERNADERO, EL CALENTAMIENTO  
GLOBAL Y SU INFLUENCIA EN LOS HOYOS DE OZONO”**

**DIRECTOR DE TESIS  
M.I. ESTEBAN BARRIOS BONILLA**

**SINODALES PROPUESTOS:  
DR. FRANCISCO SOLORIO ORDAZ  
DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO  
DR. MARTÍN SALINAS VÁSQUEZ  
DR. WILLIAM VICENTE**

**MÉXICO D.F., A 15 DE ABRIL DE 2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen Teórico.....	1
<b>Capítulo Primero</b>	
Antecedentes: El Calentamiento Global y la Relación directa con el Efecto Invernadero.....	2
Agujeros de Ozono.....	7
<b>Capítulo Segundo</b>	
Desarrollo Teórico y Estimaciones Globales de los Gases de Efecto Invernadero.....	9
Reacciones Catalíticas.....	10
Mecanismos de Formación de Ozono en la Atmósfera.....	10
Mecanismo de Formación de Ozono Troposférico.....	11
Estequiometría de la Combustión.....	12
Emisiones, Dióxido de Carbono en la Atmósfera.....	17
Escenarios del IPCC.....	18
Cálculo de Emisiones Globales de acuerdo a la ONU.....	21
Emisiones de Efecto Invernadero (en CO <sub>2</sub> ).....	25
GEI's provenientes de la Industria Energética.....	26
Gases a tratar por el Protocolo de Kyoto.....	27
CH <sub>4</sub> , Emisiones Equivalentes.....	27
N <sub>2</sub> O, Emisiones Equivalentes.....	28
<b>Capítulo Tercero</b>	
Estequiometría.....	29
Oxidaciones de los Combustibles.....	31
Cálculos Másicos para la Obtención de Oxígeno.....	43
Cálculo para la Obtención de Ozono en los Combustibles.....	46
Toneladas de Petróleo Mundial.....	57
<b>Capítulo Cuarto</b>	
Análisis de Resultados.....	63
Generación de CO <sub>2</sub> y Agua como Emisiones.....	63
Oxígeno obtenido del Agua producida a la Atmósfera como Emisiones.....	66
Déficit de Ozono debido al Secuestro del Oxígeno del Agua, para cada uno de los Combustibles.....	67
Análisis de Emisiones y Secuestro de Ozono en Referencia a la Producción Mundial de Combustibles Analizados.....	68
CONCLUSIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	76

## Resumen Teórico

El objetivo del presente es fundamentar la relación que existe entre el uso de combustibles fósiles y el fenómeno de los agujeros de ozono en la atmósfera terrestre, objetivo que se pretende alcanzar mediante la cuantificación de las emisiones de cada uno de los principales combustibles fósiles y su relación con la producción mundial de energéticos.

En primera instancia se establecieron cantidades másicas unitarias para oxidación con cada uno de los combustibles, posteriormente se calcularon las emisiones en masa de vapor de agua, dióxido de carbono y oxígeno.

A continuación se establece un análisis para las emisiones de agua solamente, dejando las demás como valores informativos, sin alcance práctico en el presente trabajo. Se analizó la cantidad de oxígeno contenido en las moléculas de agua emitidas para cada combustible, obteniendo entonces, una masa para éstas.

La siguiente parte del proceso consistió en obtener valores másicos de emisiones para el caso del ozono, también procedentes de masas unitarias de combustible, esto con la finalidad de obtener la relación directa con los valores globales de toneladas de combustibles y con las toneladas de ozono no generado debido a la constante oxidación mundial de combustibles fósiles.

De acuerdo a los datos obtenidos de las emisiones mundiales de combustibles fósiles aportados por la Secretaria de Energía, se cotejaron estos valores de producción de combustibles en barriles diarios, con los cálculos obtenidos anteriormente en el proceso descrito para poder así obtener los valores finales para casos globales.

De cada valor de los combustibles principales analizados, se estimaron los datos para emisiones, en miles de toneladas, para el agua emitida de cada uno de ellos. De este valor se parte para estimar, estequiométricamente, las miles de toneladas de oxígeno para cada uno de estos combustibles y finalmente se obtienen las miles de toneladas de ozono no generado que afectan a los agujeros de ozono creados en la atmósfera terrestre, con lo que entonces se obtiene la relación propuesta en el inicio de esta síntesis.

## CAPÍTULO PRIMERO

### ANTECEDENTES: EL CALENTAMIENTO GLOBAL Y LA RELACIÓN DIRECTA CON EL EFECTO INVERNADERO

El calentamiento global constituye un problema muy grande en la actualidad que debe ser atendido por los gobiernos de los países, sin importar si pertenecen al primer o tercer mundo.

El calentamiento global es causado por la gran demanda de energía mundial que existe en la actualidad, la cual genera a su vez una creciente demanda por los hidrocarburos, los cuales constituyen la principal fuente energética del planeta.

Los principales efectos de este fenómeno han ido presentándose de forma gradual y creciente a lo largo de las últimas décadas, que es cuando se ha dado el principal auge de los combustibles fósiles y de la energía no renovable. Los efectos se presentan mediante cambios bruscos de temperatura, deshielos y adelgazamiento de capas polares, lluvias e inundaciones importantes, además de otros aspectos ambientales importantes que cada vez se hacen más frecuentes. [1]

El cambio climático está presente, sin embargo, la velocidad con la cual está sucediendo puede disminuirse, esto con la participación activa de gobiernos y de la población en general. Las principales fuentes de energía renovable ya se encuentran listas para ser utilizadas, sin embargo, la tecnología necesaria para aplicarlas a las necesidades del hombre aún no están listas para su uso masivo, además existe la constante presión por los productores mundiales de hidrocarburos para no permitir aún que sus productos sean desplazados por estas fuentes, de las que destacan principalmente la energía eléctrica, la solar, la eólica, entre otras. [1]

Existe entonces la necesidad de encontrar alternativas energéticas para poder desarrollar mejores y más eficientes medios de producir energía, reduciendo o nulificando (dentro de lo posible), las emisiones contaminantes y los gases de efecto invernadero, los cuales se tratarán en capítulos posteriores dentro del presente trabajo.

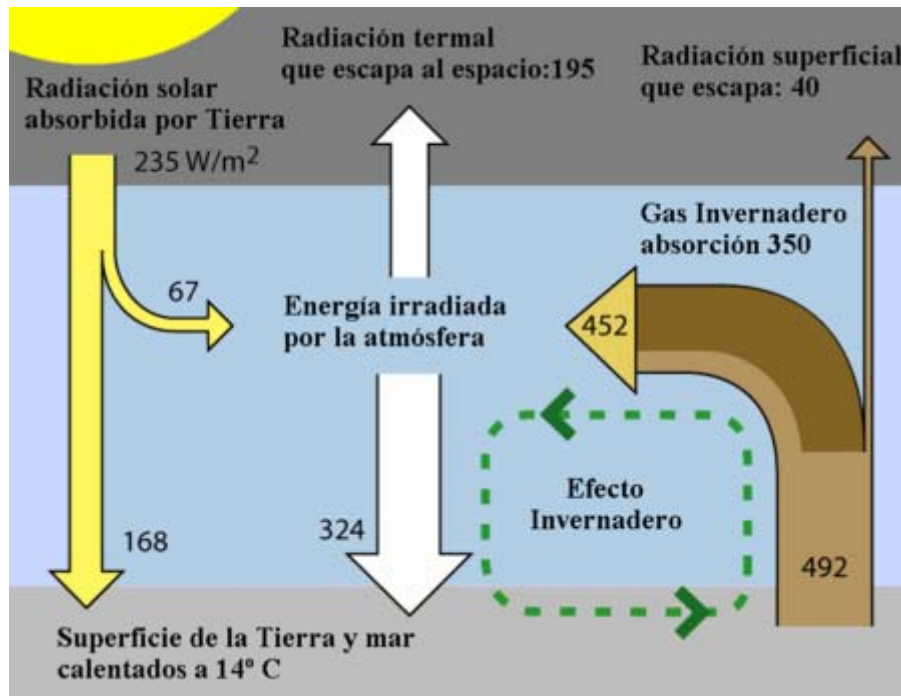
Existe un documento conocido como el **Protocolo de Kyoto** [2], donde se establecen los gases considerados como de efecto invernadero y en el cual además se establecen parámetros y metas – objetivos, firmados por varias naciones del mundo, estableciendo de esta manera una reducción en sus emisiones GEI (Gases de Efecto Invernadero).

El 11 de diciembre de 1997 se consolida este documento en el que se establece en principio, medidas más estrictas para atacar el problema de las emisiones de GEI, dando como resultado una considerable disminución en el efecto del calentamiento global y sus consecuencias. Ochenta y cuatro naciones firmaron en principio este tratado y las medidas fueron ratificadas posteriormente en los *Tratados de Marrakech*. [3]

La principal postura de este documento es la disminución de al menos 5% en comparación con los niveles de 1990 para todos los países en conjunto, esto para el periodo 2008 – 2012. [2,3]

El principal productor mundial de GEI es Estados Unidos, siendo también el responsable de aproximadamente un 25% de las emisiones GEI en el mundo. [1]

El efecto invernadero es un fenómeno que se localiza en la Tierra y que está relacionado con el cambio climático tan brusco, presente en la misma. Se define entonces como el proceso mediante el cual se genera un ciclo que mantiene ciertas cantidades de energía del sol dentro de la atmósfera, impidiendo un cierto equilibrio de energía (la energía que entra en el planeta en forma de radiación deberá ser exactamente igual que la que sale del mismo hacia el espacio, de esta manera se garantiza que la temperatura media de la superficie de la Tierra se mantiene constante en el tiempo). Al final, el planeta regresa al espacio la misma cantidad que recibió del sol, con influencia de los gases invernadero, algunos de los cuales afectan significativamente al proceso, debido a que las cantidades de los mismos han aumentado debido a distintas actividades del hombre [4]. Esto se refiere al modelo ideal con los valores promedio de GEI que se manejaban en la atmósfera a mediados del siglo XX, sin embargo, en la actualidad, la concentración de estos gases ha aumentado considerablemente en la atmósfera, lo que mantiene el calor dentro de la atmósfera, aumentando entonces la temperatura media de la Tierra.



**Fig. 1.1 Esquema del efecto invernadero [5]**

Al existir cantidades desproporcionadas o exageradas de este tipo de gases de invernadero, el equilibrio antes mencionado se ve afectado considerablemente y el mejor ejemplo de ello es el calentamiento global, que ha afectado de manera importante el

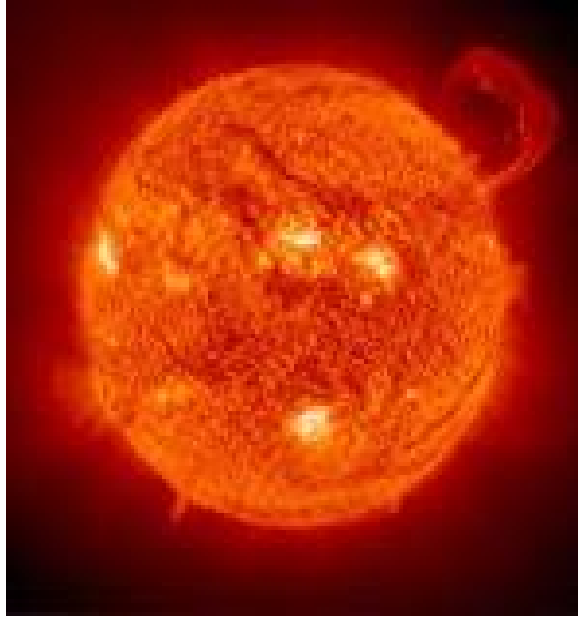
clima de todo el planeta en las últimas décadas. Al aumentar la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, éste absorbe mayores cantidades de energía radiada desde el sol hacia la superficie terrestre, guardando energía en la atmósfera y por consiguiente, aumentando la temperatura media del planeta, con picos muy altos en zonas industrializadas, donde este tipo de gases, como el CO<sub>2</sub> son abundantes. [6]

El calentamiento global es una creciente amenaza para el planeta y un ejemplo de esta afirmación es la investigación llevada a cabo por **La Universidad de Arizona** [7], donde los investigadores de la misma han afirmado que el Océano Ártico se derretirá por completo dentro de aproximadamente 100 años. Sin embargo, estudios más recientes afirman, contradiciendo dicha teoría, que este océano podría ser mar abierto para mediados del presente siglo [8]. Este tipo de datos y predicciones han sido calculados por sistemas expertos, que basan sus teorías en los cambios del clima en las últimas décadas, así como del paulatino y evidente decremento de la cubierta glacial en los polos de la Tierra.

Se utilizaron súper computadoras para calcular los cambios de clima dentro de medio siglo a partir de la fecha actual. Las simulaciones anteriores estuvieron basadas en la problemática anteriormente citada de los gases que causan el efecto invernadero, que a su vez son causantes directos del calentamiento global, es decir, que entre mayor cantidad de éstos exista en la atmósfera, la temperatura media del planeta seguirá en aumento hasta causar estragos importantes en ciudades costeras importantes con el obvio crecimiento del nivel del mar, una vez derretidos los polos y los glaciales.

Este calentamiento global se debe, por supuesto, a los gases productos de la combustión, principalmente al dióxido de carbono, entre otros, así como al crecimiento de las zonas industriales en prácticamente todos los países del mundo. **El Comité Científico Internacional del Ártico** prevé una caída de la temperatura en las zonas gélidas hasta aproximadamente los 7° C en el verano, lo cual podría ser catastrófico para las zonas congeladas, tal y como lo es el Polo Norte, de hecho se calcula que para dentro de medio siglo, el espesor del hielo en estas zonas podría ser de tan solo un metro, a comparación de los 4 metros que tiene hoy en día.

Los problemas generados por este fenómeno pueden no ser importantes para muchos en el presente, ya que los gobiernos se encuentran más preocupados por ver de dónde sacarán energía en los próximos años cuando se vuelva muy complicado y costoso extraer las reservas de petróleo e hidrocarburos. Sin embargo, deberán tomarse medidas preventivas e incluso correctivas para contrarrestar el efecto, ya que al no existir el hielo en los polos, la radiación solar no encontraría oposición para calentar el mar en la zona, derritiendo aun más el poco hielo restante, además de que se originarían cambios en el clima global, provocando inviernos mucho más intensos en los países que suelen ser fríos en esas épocas.



**Fig. 1.2 Se muestra el sol como un ejemplo figurado de la temperatura que se está alcanzando con el calentamiento global [10]**

De acuerdo con el **Intergovernmental Panel on Climate Change [11]**, la composición de la atmósfera ha cambiado a lo largo de los años. Un ejemplo concreto de este punto, es el aumento considerable en composición de la atmósfera, referente a las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y de metano  $\text{CH}_4$ . Este aumento genera alteraciones en el clima mundial, pero también afecta a procesos básicos naturales como la fotosíntesis, así como altera la reproducción de plantas y animales, lo cual puede contribuir a exterminar algunas de éstas o inclusive para generar nuevas.

El aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero principales, como el  $\text{CO}_2$ , los óxidos de nitrógeno y los aerosoles, es la principal causa del efecto invernadero excesivo que contribuye al calentamiento global y algunos datos estiman este crecimiento para saber con exactitud que tipo de gases afectan más la temperatura de la atmósfera. En los últimos 2 y medio siglos, se estima un crecimiento de aproximadamente un 31% en la concentración del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, lo cual coincide con el crecimiento industrial del planeta y el desarrollo tecnológico de las principales economías mundiales. El  $\text{CH}_4$ , también evaluado en este mismo periodo de tiempo, tuvo un aumento estimado de 151%, lo cual es un número grande para un gas básico en el efecto invernadero [11]. Este tipo de tasas de crecimiento en las concentraciones atmosféricas, se debe principalmente a las actividades industriales y económicas desarrolladas por el hombre en los últimos años y dan la pauta para pensar en cuáles serán los porcentajes de crecimiento de estos gases para los próximos dos siglos, ya que cada vez se utilizan más combustibles fósiles y se depende mucho más de la generación de la energía no renovable, basada en su mayoría en los hidrocarburos.

El calentamiento global genera consecuencias en muchos ámbitos relacionados con el clima, éstos van desde el aumento de la temperatura media terrestre, hasta alteraciones



pluviales y cambios en las estaciones del año. La temperatura media de la Tierra ha aumentado, de acuerdo con las estimaciones del **IPCC**, entre 0.4 y 0.6°C en el último siglo, siendo la década de los noventa la más cálida de la que se tenga registro en la historia, lo cual reafirma la postura de que el problema del calentamiento global es una realidad. También se ve afectada la temperatura en la superficie marina y se estima que ésta ha aumentado aproximadamente un 50% del valor que aumentó la temperatura media del aire en la superficie terrestre.

Las consecuencias de este cambio climático son imperceptibles para la mayoría de las personas, ya que los valores de crecimiento porcentual no son significativos para nadie en el corto plazo, sin embargo es una realidad latente y demostrable, el clima está cambiando y si no se hace algo al respecto, los cambios podrían terminar con la vida en la superficie terrestre tal y como la conocemos, haciendo inhabitable el planeta. Falta aún mucho tiempo para que esto suceda, pero tal vez el proceso de cambio en el corto plazo traiga consecuencias desastrosas para las actividades económicas humanas, como la pérdida de cosechas enteras o la muerte de animales que son el sustento para millones de familias en el mundo.

También se ven afectados otros parámetros climatológicos importantes como el ciclo del agua y la consecuente precipitación pluvial. Las lluvias son parte importante del clima e incluso de las actividades humanas relacionadas, por lo que una vez más, la economía en ciertas regiones del planeta podría verse afectada por un cambio en este renglón. Se habla de un ciclo hidrológico diferente y una atmósfera más capaz de retener el vapor de agua, lo cual tendría como consecuencia lapsos más marcados y constantes de sequías en ciertas zonas del planeta [11], pero también aumentarían las posibilidades de que toda esa cantidad de agua afecte la atmósfera, generando grandes cantidades de lluvia en algunos lugares, teniendo como consecuencia un mayor número de inundaciones y de problemas en zonas pobladas.

Las cubiertas glaciales también tienen su correspondiente parte del problema, ya que éstas han disminuido en espesor y extensión en las décadas recientes, sin embargo, en lo referente a los cambios imperceptibles de la temperatura, tal vez los datos relacionados con este tipo de zonas deshabitadas de la Tierra no sea importante analizarlas puntualmente, pero existen zonas de países del primer mundo en donde se pueden apreciar este tipo de cambios de manera evidente. Las zonas nevadas han disminuido su periodo de longevidad en días e incluso semanas en las últimas décadas, lo cual se traduce en periodos invernales un tanto más cortos en los países del hemisferio norte.

Algunos escenarios a futuro, planteados por simulaciones computacionales del **IPCC**, para las tendencias actuales de estas tasas de crecimiento son aquellas basadas en un considerable aumento de la población mundial y por tanto, un consecuente aumento considerable de las necesidades energéticas mundiales. Este es el punto medular y básico de este problema, una sola palabra que engloba beneficios, consecuencias negativas, desarrollo y sustentabilidad económica humana: la energía. Los próximos 50 u 80 años serán de considerable importancia en la carrera energética mundial, ya que hay solamente 2 tendencias a seguir, la primera es la actual, es decir, un mundo basado al 100% en los

hidrocarburos y derivados o afines; La segunda, que es aquella que ya empieza a tomar importancia entre algunos sectores y que se basa en la búsqueda de combustibles renovables y en utilización de energía que no tenga consecuencias negativas para el medio ambiente y el consecuente calentamiento global que se trata en este escrito.

Todos estos escenarios tienen como base el aumento de concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y demás gases invernadero y están basados en predicciones para los próximos 100 años aproximadamente. La concentración de CO<sub>2</sub> al final de este periodo oscilará entre 540 y 970 ppm, comparada con las 368 ppm que se registraron en el año 2000 [11], es decir, que en el mejor escenario, se tendrá prácticamente el doble de este nocivo gas en la atmósfera. Este es el punto de partida para los demás escenarios, ya que la consecuencia de esta cantidad de CO<sub>2</sub> (y demás gases invernadero que lo acompañarán) terminará por afectar el clima de manera importante.

### **Agujeros de ozono**

Este tema se encuentra relacionado directamente con el calentamiento global. La capa de ozono es una protección de la esfera terrestre que funciona como un bloqueador de los rayos ultravioletas más fuertes y nocivos, por lo que la formación de hoyos en esta capa es algo completamente indeseable para el beneficio de los seres humanos. La principal razón por la que se forman estos agujeros es por el uso de compuestos clorofluorocarbonados, que son compuestos derivados de los hidrocarburos saturados y se forman sustituyendo átomos de hidrógeno por átomos de cloro y flúor. Este tipo de compuestos atacan la atmósfera terrestre en la capa conocida como la estratósfera. [12]

Como se puede apreciar en este primer capítulo, el tema del calentamiento global, el efecto invernadero relacionado con el mismo y sus efectos en la capa de ozono, es muy importante como para ser ignorado por los gobiernos de los países. También se encuentra relacionado de manera directa con la economía de los mismos y con el desarrollo tecnológico en los países subdesarrollados, por lo que se estima una verdadera necesidad de tratar este problema y atacarlo desde sus cimientos, sin dejar de lado el beneficio que arroja el uso de los hidrocarburos.

Se pueden establecer teorías a futuro, buenas y malas sobre las causas de este fenómeno tanto a corto, mediano, como a largo plazo, sin embargo debe crecer una conciencia ecológica que permita un equilibrio entre los beneficios económicos de una nación y su responsabilidad por el planeta Tierra, ya que el no darse cuenta de esto a tiempo, puede terminar tal vez en un beneficio a corto plazo, pero que en medio siglo terminará por perjudicar a cada uno de los seres vivos de este planeta.

Principales gases invernadero a tratar:

- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O)
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Clorofluorocarbonos,

Entre otros, que aunque presentes en la atmósfera y causantes del llamado efecto invernadero, no son tan importantes debido a su poca concentración o importancia en el proceso.

La hipótesis principal en este estudio es en relación al secuestro de O<sub>2</sub> por parte de los productos de la combustión. Estos productos se oxidan en los procesos de combustión, consumiendo oxígeno para este proceso, lo cual está relacionado de manera directa con la falta del mismo para producir ozono. Dentro de este mismo proceso, las emisiones finales de la oxidación de los hidrocarburos se forman de agua y dióxido de carbono, principalmente y mediante los análisis señalados en el presente trabajo, se buscó establecer esta relación.

## **CAPÍTULO SEGUNDO**

### **DESARROLLO TEÓRICO Y ESTIMACIONES GLOBALES DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO**

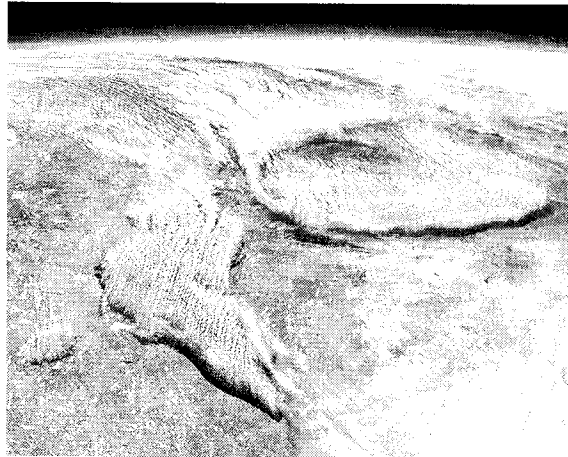
Se realizó la estequiometría de los principales gases causantes del efecto invernadero, enfocando la teoría a aquellos que son explotados por las actividades económicas del hombre, así como su directa influencia sobre el efecto invernadero y se revisaron los mecanismos de formación del ozono en la atmósfera terrestre.

Se desarrolló la estequiometría relacionada a las fórmulas de los elementos que ayudan a crear el efecto invernadero, así como los mecanismos de formación de estos compuestos.

Existe una capa delgada que circunda el planeta, la cual es causante de que se presente vida en la Tierra, esta capa se llama atmósfera y es muy frágil. Esta situación se encuentra relacionada a los fenómenos del calentamiento global y el efecto invernadero expuestos en el capítulo anterior, así como a uno de los puntos principales del presente: la capa de ozono.

Existen unos compuestos que se relacionan con el efecto invernadero llamados clorofluorocarbonos y tienen 2 principales características: la primera es que no son tóxicos y la segunda es que tienen puntos de ebullición y de fusión muy cercanos entre sí, en referencia al rango de los mismos, siendo el primero muy parecido a ciertas temperaturas ambiente [12]. Este tipo de compuestos terminan eventualmente mezclados en la atmósfera, por lo que deberán ser considerados para una presente influencia sobre el efecto invernadero.

Otro compuesto de gran importancia que se encuentra en las capas atmosféricas, es el ozono ( $O_3$ ). Este gas es de vital importancia para la vida en la superficie terrestre, ya que es el encargado de proteger a la superficie de la Tierra de los efectos nocivos de la radiación solar, la cual puede causar incluso cáncer en la piel. El gas ozono absorbe esta radiación, dejando pasar solo ciertas cantidades de la misma, sin embargo, existen ciertos mecanismos biológicos que necesitan de la luz ultra violeta para realizar sus funciones, por lo que se puede concluir que el ozono se encarga de regular las cantidades necesarias de radiación que deben llegar a la superficie terrestre. [12]



**Fig. 2.1** Atmósfera terrestre [13]

### **Reacciones Catalíticas**

Los procesos industriales generan cantidades importantes de CFC's (clorofluorocarbonos), las cuales se mantienen en la atmósfera durante un cierto tiempo, emigrando casi inmediatamente a la zona llamada estratósfera (que es donde se encuentra la mayor cantidad del gas ozono). Cabe mencionar que las cantidades de ozono en esta capa se miden en partes por millón (ppm) y las cantidades de CFC's se miden en partes por billón (ppb), lo cual significa que la cantidad de CFC's en la estratósfera es muchísimo menor que la del ozono. En esta capa atmosférica, los CFC's se colocan por arriba de la capa de ozono y es justo en ese momento cuando son alcanzados por la radiación solar antes de ser filtrada por dicha capa, esto provoca la descomposición de los CFC's, generando así átomos de cloro independientes que son químicamente muy reactivos. Se le llama reacción catalítica al proceso de destrucción de las moléculas del ozono gracias a los átomos de cloro mencionados con anterioridad [12]. Los átomos de cloro se estancan en la estratosfera durante aproximadamente un siglo, lo cual lleva a pensar en que si se mantiene el ritmo de generación industrial de CFC's, se mantendrá la tendencia de la destrucción de la capa de ozono por muchos años más.

El Protocolo de Montreal [14] fue un intento de hace muchos años para detener el fenómeno de destrucción de la capa de ozono, todo esto mediante la reducción e incluso la detención de generación de CFC's en países industrializados.

### **Mecanismos de Formación de Ozono en la Atmósfera**

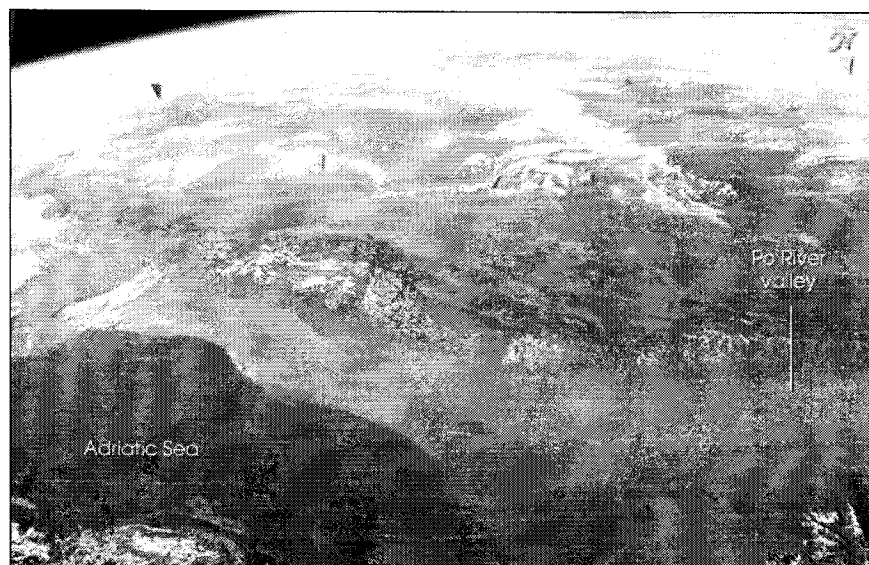
El ozono es una molécula que consta de tres átomos de oxígeno y el gas que respiramos es una molécula de solo dos átomos de oxígeno, mencionando que también existe el oxígeno simple en la atmósfera. Existen ciertas reacciones químicas que desprenden el  $O_2$  en la atmósfera para después juntarse con otros átomos de O, generando de esta manera mayores cantidades de ozono en la ionósfera, fuera de la estratósfera. En esta parte no se da el fenómeno de las reacciones catalíticas, ya que la luz solar llega filtrada y no interviene con los CFC's. [12]

Otro mecanismo de formación del ozono presente en la biósfera, está basado en los óxidos de nitrógeno. Estos compuestos se encargan de disociar el ozono, pero también pueden regenerarlo mediante reacciones químicas específicas, en especial las que se generan con los hidrocarburos presentes en la atmósfera, los cuales se oxidan en la misma y reaccionan con el oxígeno. Al darse estas condiciones entre las moléculas de hidrocarburos, el oxígeno y los óxidos de nitrógeno, se genera un compuesto conocido como dióxido de nitrógeno, el cual genera átomos de oxígeno que a su vez generan mayores cantidades de ozono en la atmósfera. Los óxidos de nitrógeno (NOx) se generan después de la combustión con la combinación a altas temperaturas del oxígeno y del nitrógeno [12].

El ozono de la ionósfera es el que detiene los rayos UV dañinos para la vida en la Tierra y en la zona conocida como baja atmósfera es donde se vuelve peligroso para la salud de los seres vivos, ya que ahí es donde se puede respirar este gas.

### **Mecanismo de Formación del Ozono Troposférico**

En esta zona de la atmósfera se forma el conocido smog de las ciudades muy grandes y contaminadas. Para la formación de smog se necesita la actuación de los hidrocarburos o de otro tipo de compuestos como las olefinas, ya que son menos estables que los hidrocarburos y se descomponen por tanto, mucho más rápido, lo cual ayuda para formar otro tipo de compuestos, con los óxidos de nitrógeno, mediante reacciones químicas específicas. [12]



**Fig. 2.2 Smog en el planeta desde satélite [15]**

Es entonces aquí donde se deben tomar en cuenta ciertos factores importantes relacionados al peligro para la salud que significa la formación de ozono en la baja atmósfera y el mejor ejemplo de este problema se encuentra en la Ciudad de México. Se tiene entonces que el ozono puede ser benéfico o perjudicial para la vida del planeta, esto dependerá de la zona de la atmósfera en la que se encuentre y en la que se forme o se destruya.

El control de emisiones por parte del gobierno deberá ser entonces un tema recurrente y además urgente para implementarse de manera efectiva y rápida, ya que los hidrocarburos provenientes de la combustión, tanto en industrias, como en automóviles, son un factor para la formación de ozono en la tropósfera, pero además, también deberá controlarse el nivel de emisiones en cuanto a los NO<sub>x</sub>, ya que de acuerdo a los mecanismos de formación, también son factor determinante en la formación de ozono, así como en la destrucción del mismo [12], esto dependiendo de factores planteados anteriormente.

La relación con el capítulo anterior viene de manera clara en este punto, ya que algunos factores planteados en éste, tales como los hidrocarburos y los NO<sub>x</sub>, son retomados en el tema del ozono, ya que influyen en ambos tópicos, aunque de manera distinta por supuesto, ya que el calentamiento global y el efecto invernadero son un camino tal vez paralelo, pero diferente al fin de lo que se refiere a la formación del ozono en la atmósfera.

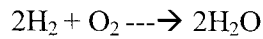
Otro punto importante a retomar es el aspecto socio-político-económico. Tal vez en un principio no tenga mucho sentido hablar de este tema, pero de manera profunda, es un punto neurálgico para solucionar el problema de la generación del ozono fuera de la atmósfera. Viene el asunto de los países industrializados y los que están en vías de desarrollo, como México y se relaciona con las intenciones de algún país de pertenecer al primer mundo, con el fin de mejorar el nivel de vida de sus habitantes y elevar la economía para volverse más competitivos en el mercado de la energía. Se debe invertir considerablemente en muchos renglones para lograr una economía creciente y sólida, esto necesita ir de la mano con mejor tecnología, mejor ingeniería, etc. y desde luego esto repercute en mayores emisiones contaminantes y más ozono. Desde el punto de vista social, en México la gente cuenta con menos recursos y esto deriva en no poder adquirir, por ejemplo, coches nuevos menos contaminantes o que no afecten a la atmósfera.

### **Estequiometría de la Combustión**

Todas las reacciones químicas se describen por medio de sus ecuaciones y del balanceo de las mismas, para este propósito se debe recurrir a la estequiometría, que no es otra cosa que la medida de los elementos o átomos presentes en una reacción. La estequiometría está basada en el principio de la conservación de la masa, ya que los átomos se transforman en moléculas distintas, pero no desaparecen ni se crean. Esta medición es importante para conocer los niveles de concentración en la atmósfera, para efectos de la combustión, de todos los gases involucrados en las emisiones contaminantes causadas por las actividades económicas del hombre.

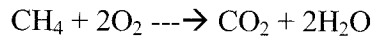
Las reacciones químicas sirven para evaluar cómo los átomos reaccionan con otros distintos para formar moléculas y/o iones y viceversa, vigilando que la cantidad de átomos de cada especie se conserve.

El agua es producida durante la combustión del hidrógeno contenido en los combustibles y también es uno de los principales causantes del efecto invernadero excesivo y sin embargo no es considerado peligroso para el planeta, ya que esta molécula es la base para que exista la vida en el mismo. Sin embargo, los vapores de agua son causantes de desequilibrar la temperatura del ambiente, incrementando el ciclo del agua.

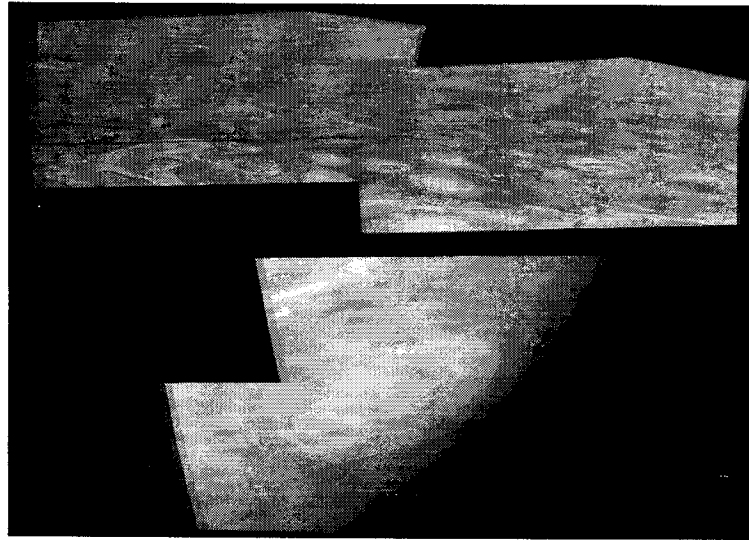


Se tiene entonces el proceso de formación de esta sustancia de la manera establecida, donde reaccionan dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno para formar agua, molécula que en este estudio fue importante en la relación de los hidrocarburos con el calentamiento global.

Para el caso del gas natural, se tiene el componente más importante del mismo, el metano [ $\text{CH}_4$ ]. Para obtenerlo, se realiza la combustión del metano junto con el oxígeno y se consigue entonces agua con bióxido de carbono gaseoso.

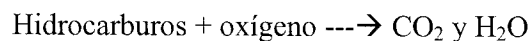


De la misma manera tiene la reacción para el metano, ya que la combustión del metano es la misma que la del gas natural, ya que éste se compone, para efectos prácticos, de metano en su totalidad.



**Fig. 2.3 Metano estratosférico [18]**

Los hidrocarburos son compuestos que se forman de carbono y de hidrógeno, por ejemplo, el metano, el cual se mencionó con anterioridad. Los hidrocarburos reaccionan por lo regular en procesos donde se involucran reacciones con oxígeno del aire, asimismo, los combustibles derivados del petróleo. [16, 17].

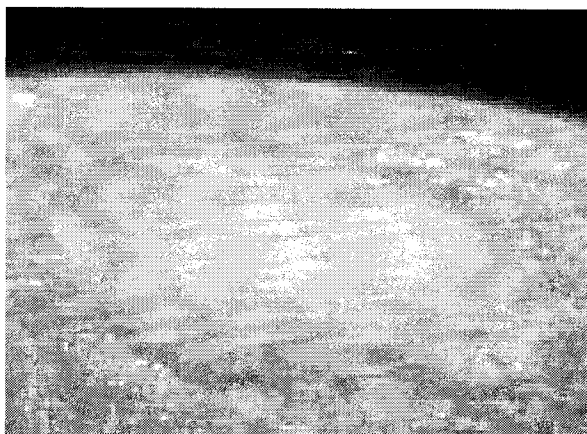


El monóxido de carbono [ $\text{CO}$ ] se genera al existir un déficit de oxígeno en la reacción en la combustión y si el oxígeno es muy escaso, se tendrán entonces partículas de carbón (hollín), también se forma con tiempos y temperaturas bajas en las zonas correspondientes. Al tener una combustión satisfactoria en cuanto a niveles de oxígeno, se produce entonces dióxido de carbono [ $\text{CO}_2$ ].

El monóxido de carbono se genera entonces, después de una combustión incompleta en combustibles con carbono. Éste es el más abundante de los gases contaminantes (en



relación másica), aproximadamente de 0.05 hasta 0.1 ppm y se estima un total de  $5.2 \times 10^{14}$  [g] atmosféricos.

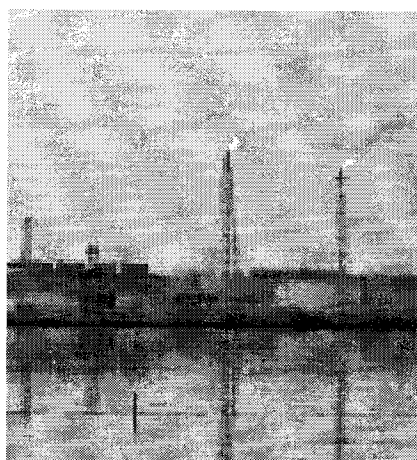


**Fig. 2.4 Monóxido de carbono [19]**

La combustión con átomos de oxígeno, carbono e hidrógeno también producen dióxido de carbono y agua como emisiones producto de la reacción química, como por ejemplo, el metanol [ $\text{CH}_3\text{OH}$ ] y el etanol [ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ].

Hasta la década de los 90's se tenían datos de un promedio de 20 mil millones de toneladas de dióxido de carbono arrojadas a la atmósfera producto de la combustión, debido a las actividades económicas del hombre. La concentración de  $\text{CO}_2$  se ha incrementado en un 25% desde la Revolución Industrial [16, 17], lo mismo sucede con el metano [ $\text{CH}_4$ ].

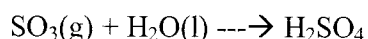
El petróleo es un líquido que se compone de hidrocarburos (carbono e hidrógeno) principalmente, pero además contiene azufre, nitrógeno y oxígeno. El carbón es un combustible sólido con un gran historial en la actividad industrial del hombre, (además de ser el combustible fósil más abundante en la Tierra) así como en los transportes, se compone de hidrocarburos con gran peso molecular y compuestos de azufre, oxígeno y nitrógeno. Por otro lado se tiene el gas natural, que se compone por hidrocarburos gaseosos, conteniendo metano (principalmente). [16, 17].



### Fig. 2.5 El proceso para la obtención del petróleo [20]

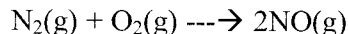
Uno de los gases de efecto invernadero más contaminante y peligrosos para la salud, es el dióxido de azufre [SO<sub>2</sub>], este gas proviene de la combustión con petróleo y también en gran parte por la de carbón. El azufre contenido en estos dos combustibles es el principal factor para determinar la cantidad de SO<sub>2</sub>, ya que a menor cantidad de éste, las emisiones de SO<sub>2</sub> serán menores y por tanto, menos contaminantes. En los Estados Unidos se liberan un aproximado de 30 millones de toneladas de SO<sub>2</sub> a la atmósfera cada año, sin embargo, también existe el SO<sub>3</sub>, que se forma por la oxidación del SO<sub>2</sub>.

Se tiene entonces una reacción química con la que se logra formar el ácido sulfúrico al disolverse el SO<sub>3</sub> (lluvia ácida).

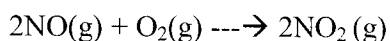


Los óxidos de nitrógeno, también llamados NO<sub>x</sub>, son componentes principales en el efecto invernadero y por ende, son causa recurrente para el calentamiento global. Existen muchos tipos de estos compuestos, desde el monóxido de nitrógeno, hasta elementos más complejos que no necesariamente son provenientes de emisiones producto de la combustión. Los NO<sub>x</sub> son componentes del smog, causante de la gran contaminación urbana en las principales ciudades del mundo (que por lo general es provocada por los automóviles y por las industrias).

El óxido nítrico proviene de la reacción química en la combustión entre el nitrógeno y el oxígeno de la misma



El valor "x" de los NO<sub>x</sub> se refiere a la capacidad que tienen estos óxidos de formar diversos compuestos, pero para efectos de emisiones contaminantes debido a procesos de combustión, este valor será 1 ó 2, dependiendo si es monóxido de nitrógeno NO ó dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>. El primero es más común en este tipo de procesos, sin embargo, ambos están presentes.



Las concentraciones comunes de contaminantes, en partes por millón [ppm], en la atmósfera producto de la combustión, son principalmente:

NO <sub>x</sub>	0.2
NH <sub>3</sub>	0.002
CO	40
O <sub>3</sub>	0.5
CH <sub>4</sub>	2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.5
Olefinas	0.25
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.25
Aldehídos	0.6
SO <sub>2</sub>	0.2

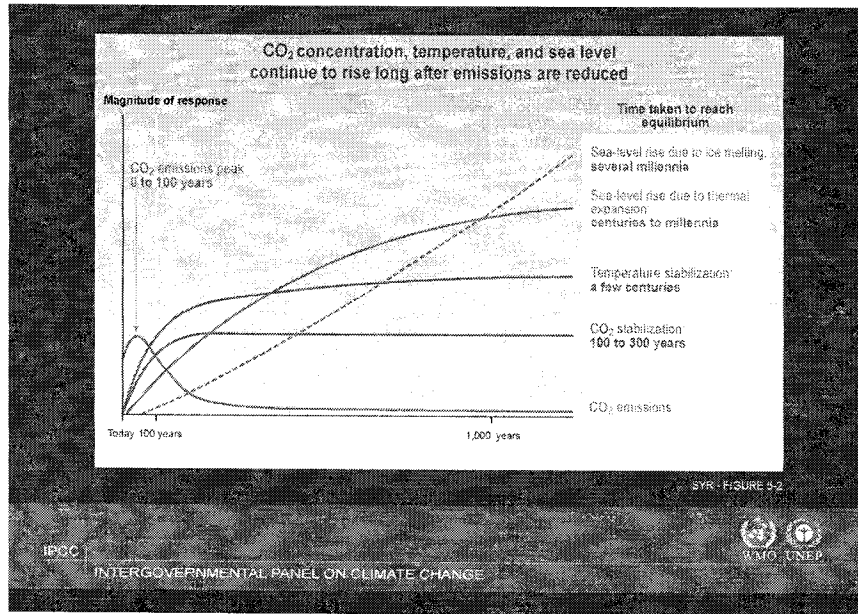
**Tabla 2.1 Concentraciones contaminantes [16, 17].**

Los convertidores catalíticos tienen como objetivo eliminar los hidrocarburos emitidos hacia la atmósfera desde las cámaras del motor, producto de su combustión, así como también bloquean el paso de los NO<sub>x</sub>.

El problema de la contaminación y por ende, el calentamiento global, reside principalmente en la sobre explotación de pozos petroleros para obtener tanta gasolina como sea posible. Ésta es la forma más comercial del petróleo y por lo tanto, la más utilizada y contaminante.

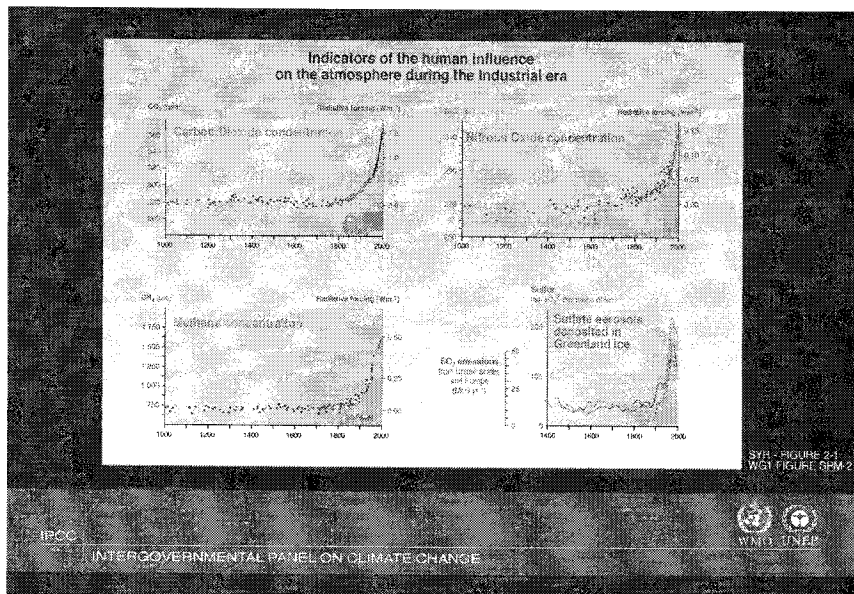
La gasolina es una mezcla de hidrocarburos con mezclas de alcanos y aromáticos. Existen muchos tipos de ésta y la calidad de los mismos depende principalmente de su octanaje y su contenido de plomo y azufre. Los octanos es la forma en la que se mide la resistencia a la compresión por parte del combustible, por lo que las gasolinas con altos octanajes, tendrán mejor combustión que las que tengan un nivel bajo. Los octanos aumentan al añadirle a la gasolina los llamados *agentes antidetonantes*. [16, 17]

## Emisiones. Dióxido de carbono en la atmósfera



**Fig. 2.6 Concentraciones de CO<sub>2</sub> a largo plazo [11]**

El gráfico muestra las dos principales consecuencias del exceso de dióxido de carbono en la atmósfera, en primer lugar se tiene un aumento del nivel medio del mar y en segundo, el aumento y posterior estabilización de la temperatura media de la Tierra.



**Fig. 2.7 Influencia humana en la atmósfera durante la era industrial [11]**

Para el dióxido de carbono se tiene un aumento en la atmósfera en aproximadamente 80 partes por millón (ppm) en un lapso de un milenio, lo que significa un aumento por efecto de radiación de casi  $1.5 \text{ W/m}^2$ . Para el óxido nítrico y el metano también ocurre este

fenómeno, pero en menor proporción (partes por billón), por lo que su efecto por radiación en la Tierra es menor, pero también en aumento.

### Escenarios de acuerdo al Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) IS92 a - f:

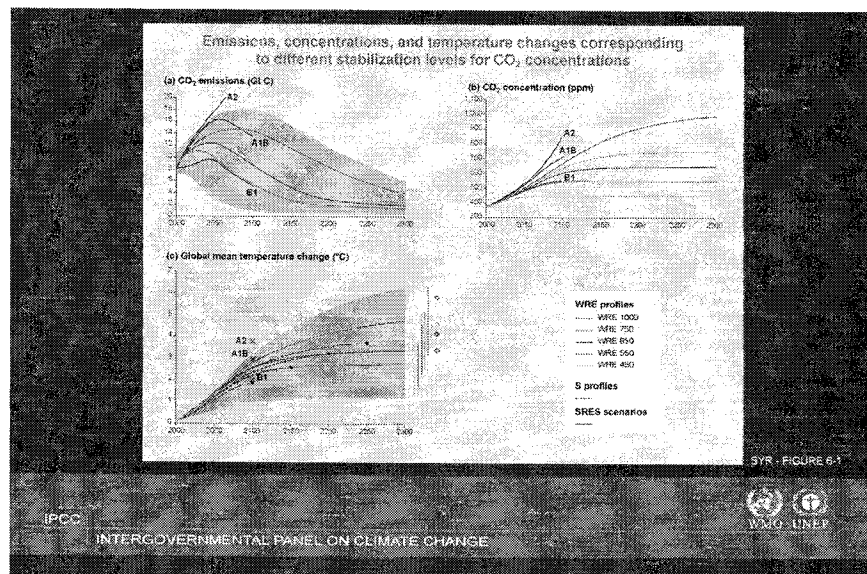
IS92 a y b: Emisiones intermedias en comparación con las demás IS92, la diferencia entre “a” y “b” radica en la información manejada para cada una con respecto a las medidas adoptadas por los países en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub>.

IS92 c: Establece un escenario de disminución de emisiones, ya que contempla falta de combustibles fósiles, bajo crecimiento económico y población baja.

IS92 d: Establece casi el mismo escenario anterior, con la diferencia de manejar una economía más fuerte, por lo que las emisiones aumentan.

IS92 e: Establece una abundancia de combustibles fósiles, tasa de población regular y una economía importante, por lo que aquí se establece el mayor nivel de emisiones de los escenarios.

IS92 f: Establece un alta población, pero con una economía menor que el anterior escenario, por lo que las emisiones disminuyen con respecto a éste, sin embargo, se establece como el escenario con el segundo nivel de mayores emisiones.

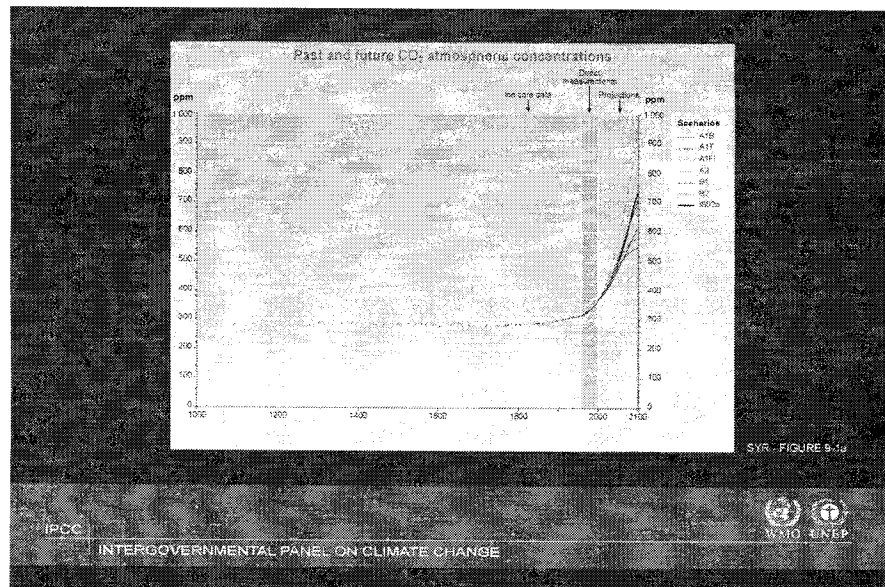


**Fig. 2.8 Niveles de estabilización de CO<sub>2</sub>. Emisiones, concentración y temperatura relacionados. [11]**

De acuerdo a los diferentes perfiles establecidos por el IPCC, se establecen tendencias para los próximos 300 años en la Tierra, utilizando concentraciones en ppm de CO<sub>2</sub>, así como emisiones (en giga toneladas de carbono – Gt C) del mismo. Los efectos establecen, dentro del mismo periodo de años, un cambio en la temperatura media del planeta de aprox. 5° C para el peor escenario.

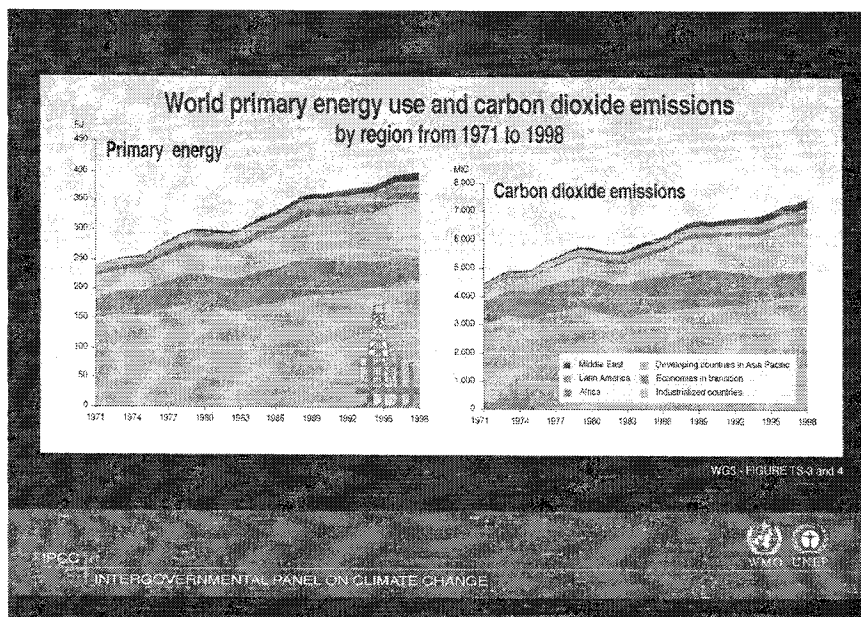
## Propuesta para limitación de emisiones relacionada a los escenarios IPCC

- Austria – Alemania: Reducción de emisiones entre el 15 – 20% antes de 2010
- Bélgica: Reducción de emisiones entre el 10 – 20% antes de 2010
- Dinamarca: Reducción de emisiones entre el 50% antes de 2030
- Suiza: Reducción de emisiones entre el 10% antes de 2010
- Reino Unido: Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero entre el 10% antes de 2010
- Congo: Reducción de emisiones entre el 15% antes de 2010 y de un 20% antes de 2020
- Países Bajos: Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en un 1 - 2% a partir del 2000
- Francia: Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por habitante entre el 7 – 10% antes de 2010, además, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero cada año en 1.6 – 2.2% desde el 2010 hasta el 2100



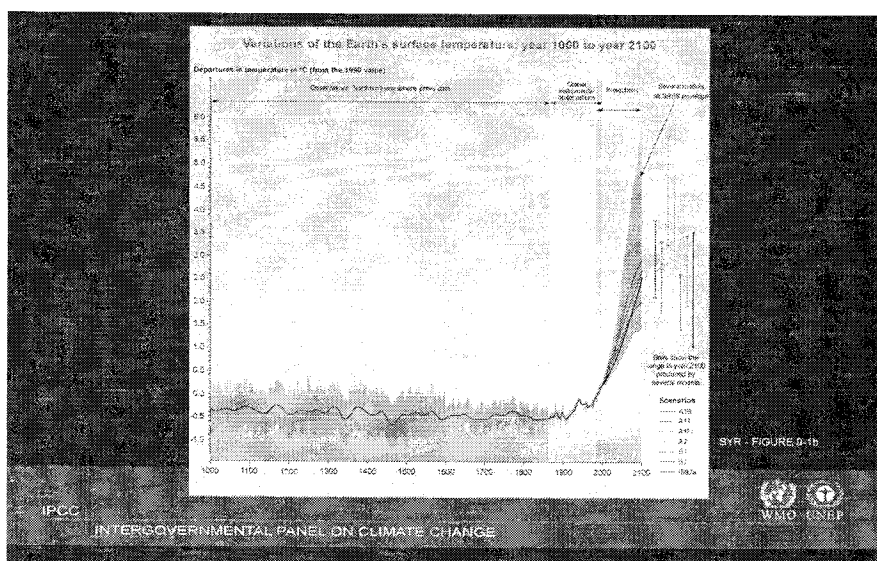
**Fig. 2.9 Concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, pasadas y futuras [11]**

Se establece la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, tanto pasada, como a futuro. La gráfica muestra concentraciones por debajo de las 300 ppm durante 900 años, siendo el siglo XX (año de desarrollo industrial) el año en el que empiezan éstas a aumentar. Las tendencias en la concentración proyectan un aumento de entre 500 y 1000 ppm en el próximo siglo.



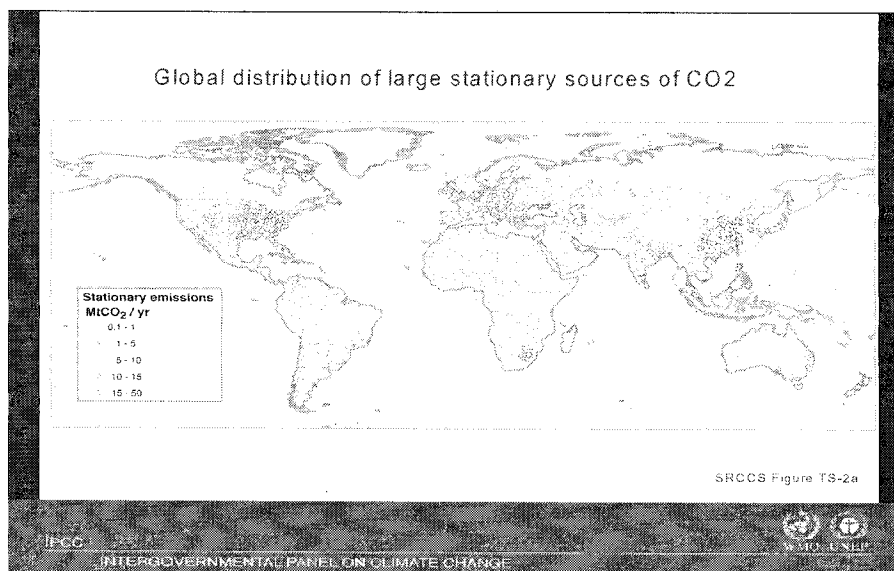
**Fig. 2.10 Uso primario de la energía y emisiones de dióxido de carbono [11]**

Usos primarios de la energía a nivel global, separado por regiones específicas mundiales. Se tiene además esta misma clasificación regional para describir el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> en un periodo de 30 años, durante el final del siglo XX.



**Fig. 2.11 Variaciones de temperatura media terrestre, periodo 1000 – 2100 [11]**

En esta gráfica se aprecia el gradiente de temperatura medido en un periodo de más de un milenio en la atmósfera terrestre. La temperatura media se mantiene relativamente estable hasta que comienza la época de desarrollo industrial, siglo XX. Las proyecciones de acuerdo a los escenarios establecidos por IPCC, establecen aumentos en la temperatura de hasta 6° C para el peor de los escenarios, en caso de mantenerse o incrementarse el nivel de CO<sub>2</sub> en la atmósfera actual.



**Fig. 2.12 Distribución global de emisiones de CO<sub>2</sub>. Las zonas en el planeta con mayor colaboración de estas emisiones son los Estados Unidos, Europa y el Lejano Oriente, además de Saudi Arabia. [11]**

### **Cálculo de Emisiones Globales, según Datos de la ONU [22]**

De acuerdo a los cálculos obtenidos por esta organización, se tienen los siguientes cálculos estimados, así como su porcentaje de crecimiento y variación en años recientes, algunos de ellos han sido calculados haciendo referencia a años recientes, sin embargo existen algunos datos que no han sido actualizados en años, ya sea por cuestiones económicas o políticas determinadas en cada uno de estos países.

Las tablas detalladas para cada uno de los países pertenecientes a la ONU se encuentran contenidas en el anexo de este trabajo para una rápida consulta particular de cada país.

### **CO<sub>2</sub>**

Los datos para el dióxido de carbono provienen tanto de fuentes móviles (transporte), como de fuentes fijas como la industria energética, entre otras.

Cabe mencionar la diferencia entre ambas:

**Fuentes móviles de emisiones.** Este término se refiere al origen de las emisiones y se considera móvil cuando se habla de emisiones de automóviles, transporte terrestre, aviones, barcos y demás vehículos donde existan los hidrocarburos como medio de impulso.

**Fuentes fijas de emisiones.** Este término se refiere a todos aquellos procesos que involucran combustión con combustibles fósiles, pero que su origen se mantiene en un mismo sitio, tales como plantas de energía y procesos industriales (fábricas, armadoras, fundidoras, etc.).



De acuerdo entonces al CDIAC [22] por sus siglas en inglés, se tienen los estimados para este tipo de emisiones, los cuales provienen no solo de procesos referentes a la combustión, sino incluso de quema de madera y de combustibles tales como la biomasa, sin embargo aún no se han encontrado formas tan precisas para calcular este tipo de porcentajes, por lo que los cálculos son enfocados a emisiones principales (fuentes móviles y fijas).

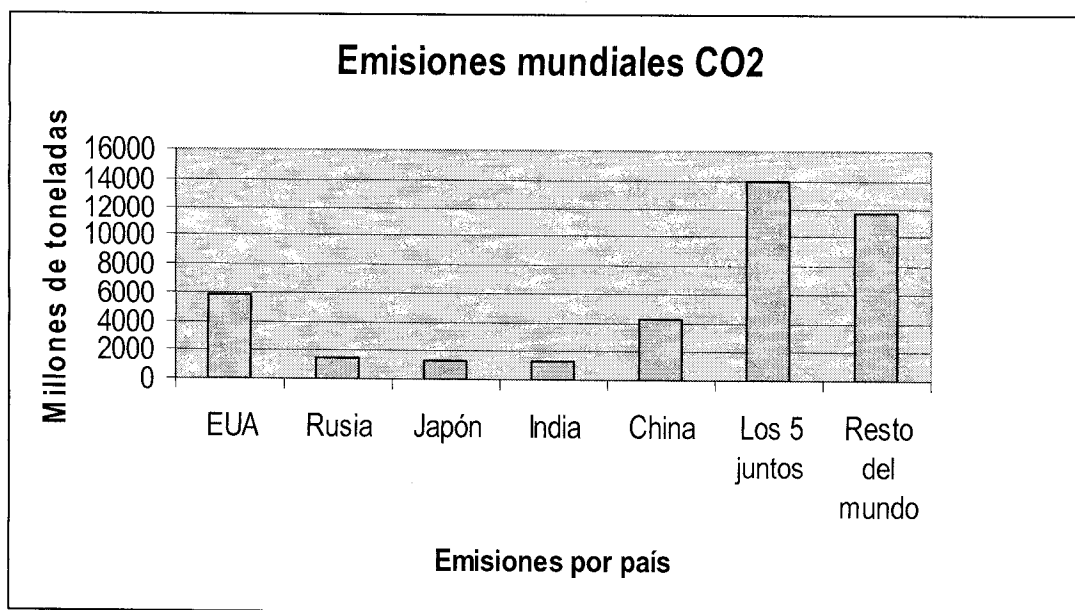
El IPCC [11] ha establecido un descenso entre el 50 – 70 % en las emisiones globales de dióxido de carbono para el año 2100, esto con el fin de llegar de nuevo al nivel mundial alcanzado en el año de 1990. El dióxido de carbono es el mayor causante del calentamiento global y al disminuir éste en los porcentajes establecidos anteriormente, la temperatura media mundial pudiera llegar a estabilizarse dentro de aproximadamente 100 años.

Los siguientes datos son actuales a 2007 y se contempla un crecimiento sostenido de CO<sub>2</sub>, sobre todo en países industrializados (Estados Unidos, China, India, Europa, Japón entre otros).

Las emisiones **mundiales de CO<sub>2</sub>** contabilizadas y actualizadas al año 2003, según la ONU [21], son del orden de **25,642.52 millones de toneladas**.

Dentro de estos datos también se pueden calcular las diferencias entre las emisiones de dióxido de carbono de cada país perteneciente a la ONU en el año de 1990 y las emisiones actualizadas, dando como resultado aumentos y disminuciones en cada país, siendo los que más contribuyen los **Estados Unidos con 5,841.5 millones de toneladas** y un 16.6 % de aumento con respecto a las emisiones de 1990; **Rusia con 1,509 millones de toneladas**, pero con una considerable disminución del 36 % con respecto a la época de la **Unión Soviética**; **Japón con 1,259.43 mill. de ton.** y con un aumento del 12 % en los últimos 15 años; **La India con 1,275 mill. de ton.**, aumentando prácticamente al doble sus emisiones de CO<sub>2</sub> en un periodo de 13 años. El caso más crítico ha sido el de **China**, ya que en los últimos 15 años ha aumentado casi un 80 % sus emisiones de dióxido de carbono, lo cual va relacionado con su crecimiento económico a últimos años, **4,151 mill. de ton.** **México aporta 416.7 mill. de ton.** a las emisiones de dióxido de carbono, teniendo un aumento de casi 11 % con respecto al '90. (Ver gráfica 2.1)

Los datos anteriores arrojan estimaciones importantes y a la vez preocupantes. El total de emisiones de estos países suma un total de **14,036 mill. de ton.**, dando como resultado que el resto de los países contemplados en el estudio de emisiones (resto del mundo) llega apenas a **11,606.52 mill. de ton.**, lo cual no se compara a lo que aportan estos 5 países a la atmósfera y por lo tanto, al calentamiento global.



**Gráfica 2.1 E.U.A. es el mayor productor mundial de CO<sub>2</sub> seguido de China. Estos 2 países por sí solos son capaces de compararse en emisiones de este gas con el resto del mundo.**

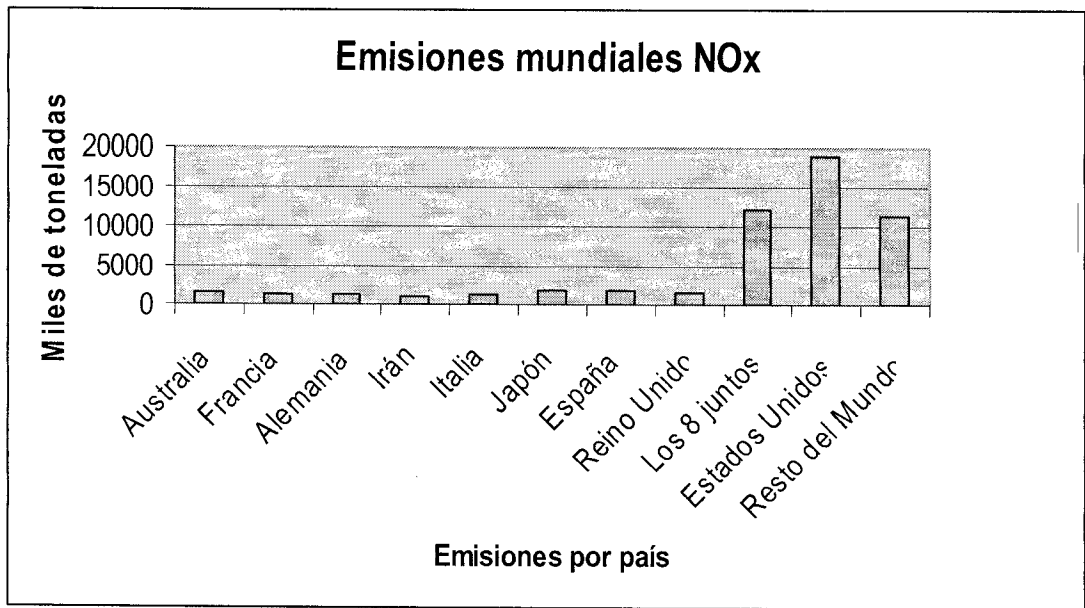
### NOx

Este es otro tipo de emisión que contribuye al efecto invernadero y al problema del calentamiento global. Son emisiones provenientes de hidrocarburos y de otro tipo de procesos. La “x” se coloca por que ésta puede tomar valores distintos dependiendo del proceso que causa estas emisiones y también dependerá del valor de ésta lo dañino que puede llegar a ser un NOx para el ambiente.

Los datos y su actualidad dependen en gran medida de cada país, ya que algunas actualizaciones no son del todo recientes para los datos oficiales de la ONU.

El total de NOx emitido **a nivel global** es de **42.582 millones de toneladas**. Los principales exponentes de este tipo de emisiones son **Australia** con **1,611.3 kton**, mostrando un aumento del 20 % desde 1990; **Francia** con **1,412.8 kton**, mostrando un decremento del 26.4 % desde '90; **Alemania** con **1,386 kton** y un decremento de 48.4 %; **Irán** tiene emisiones de **1,184 kton** y no se tiene registro de cambio en éstas; **Italia** con **1,239 kton** ha reducido éstas en un 35 %; **Japón** con **1,854 kton**, tiene una disminución insignificante del 2.6 %; **España** con **1,867 kton** aumentó un 56.8 % en los últimos años; El **Reino Unido** tiene **1,580 kton** con una disminución del 42.4 %; Los **Estados Unidos** con **19,043.2 kton**, a pesar de la disminución del 13.8 %. **México** tiene **962.8 kton** y no se tiene un registro de cambio en los últimos años, ya que este dato pertenece a 1990.

En el renglón de las emisiones de NOx, los Estados Unidos vuelven a ser el país que más ha contribuido a la contaminación de la atmósfera, seguido de otros países que aunque han disminuido sus emisiones (principalmente en Europa), aún tienen una importante contribución al ambiente con estas emisiones.



**Gráfica 2.2 E.U.A. es por mucho el mayor productor mundial de este GEI. Aún los siguientes productores del mismo, juntos, se quedan lejos en números de alcanzarlo.**

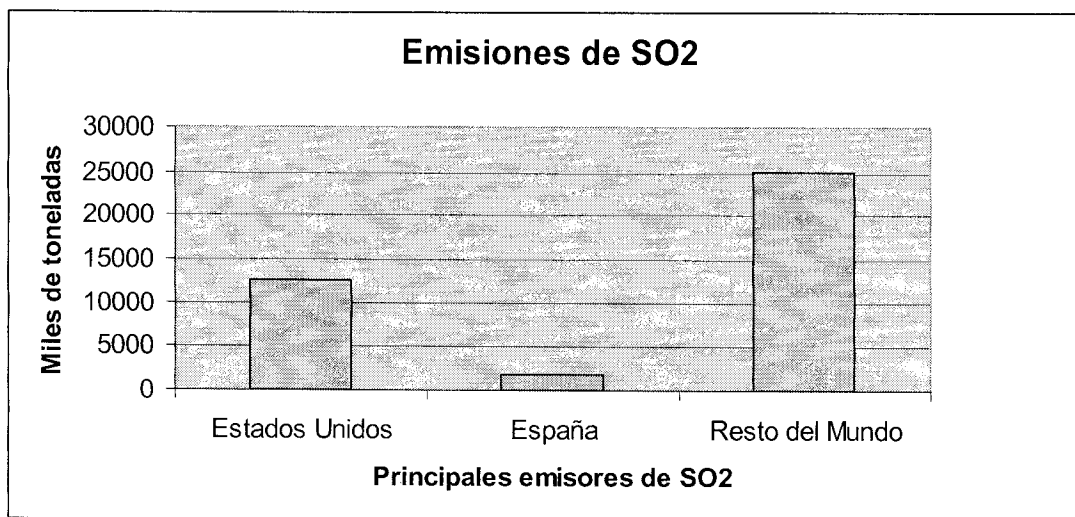
La metodología para la obtención de los datos por país está basada en las guías para cálculo de datos del IPCC. [11]

Los datos obtenidos corresponden a las emisiones provenientes de combustión, tanto del sector de energía, como del sector de transportes, exceptuando el de aviación y el transporte marino, así como actividades industriales pequeñas o residenciales.

Las emisiones de NOx contribuyen a la formación de ozono en la tropósfera, el cual es dañino para la salud. Las principales fuentes de NOx son la gasolina y el diesel, al reaccionar el nitrógeno con el oxígeno del aire. Una de las principales fuentes de este tipo de emisiones son los automóviles, los cuales constan de un convertidor catalítico que se encarga de reducir este tipo de emisiones lo más posible, siendo éste un aparato de carácter obligatorio en muchos países.

### SO<sub>2</sub>

Las **emisiones totales mundiales** de SO<sub>2</sub> ascienden a **25,227.7 kilo toneladas**. Las principales fuentes de emisión de SO<sub>2</sub> son principalmente la biomasa, pero en general proviene de la combustión de los combustibles fósiles que contienen azufre en su composición.



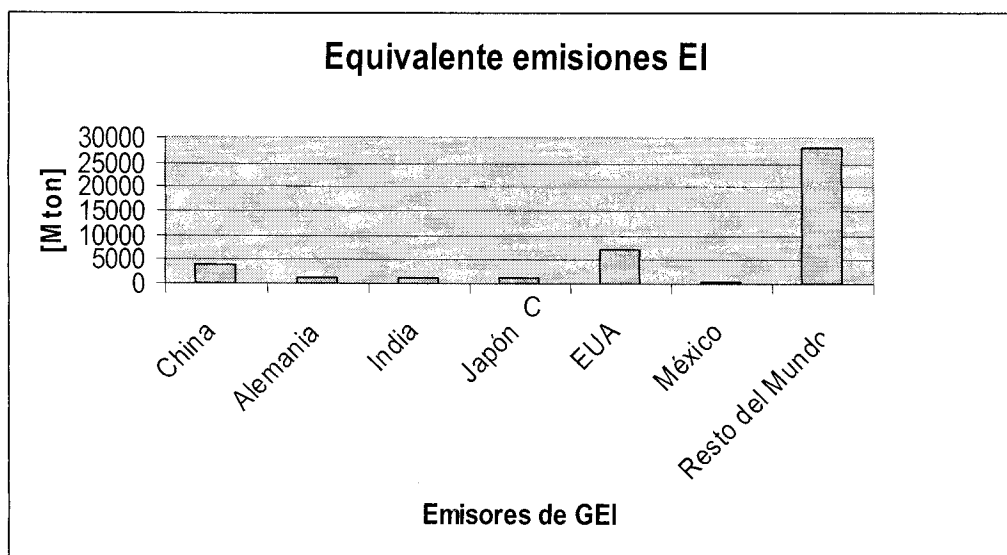
**Gráfica 2.3 Estados Unidos produce prácticamente la mitad de SO<sub>2</sub> en el mundo y España, su más cercano competidor, no se acerca ni a la décima parte de emisiones mundiales de este GEI.**

Los datos obtenidos corresponden a las emisiones provenientes de combustión, tanto del sector de energía, como del sector de transportes, exceptuando el de aviación y el transporte marino, así como actividades industriales pequeñas o residenciales. Los datos referentes a estos parámetros son muy diversos entre países de la ONU, por lo que las muestras para las estadísticas, fueron tomadas con datos equitativos de todos los países.

La forma de medir este tipo de emisiones es gracias al sulfuro contenido en las emisiones del combustible

#### **Emisiones de efecto invernadero, para CO<sub>2</sub>**

Las **emisiones totales** de emisiones equivalentes al CO<sub>2</sub> son de **27,858.85 millones de toneladas**. Estas emisiones provienen de todo tipo de fuentes, tanto fijas como móviles y se relacionan directamente con los escenarios del IPCC:



**Gráfica 2.4 Estados Unidos y China son los principales exponentes en este rubro, ya que juntos cuentan con casi la mitad de las emisiones que causan el efecto invernadero, en términos de CO<sub>2</sub>.**

#### **Gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la industria energética**

Este renglón corresponde al escenario 1 planteado por el IPCC. Se refiere particularmente al uso de combustibles fósiles relacionados con la industria. [11]

#### **GEI provenientes de procesos**

Son emisiones provenientes de la industria química, la industria del metal, producción y usos de minerales, entre otras. Escenario correspondiente al IPCC 2.

#### **GEI debido a agricultura y desperdicios**

El renglón de la agricultura obedece a los cultivos principales en cada país, tanto relacionados con los procesos de los mismos, como a los métodos para recolección y conservación de éstos.

Para los desperdicios se toman en cuenta los escenarios del nivel 6 del IPCC, los cuales tiene que ver con incineración de desechos, desperdicios sólidos en basureros y demás actividades relacionadas. [11]

Los principales documentos que rigen este tipo de emisiones (GEI) establecen como principal problema el aumento de la temperatura media de la superficie terrestre en los últimos años y además coinciden en la necesidad de reducir las emisiones para poder prever efectos irreversibles en las actividades humanas, pero principalmente en el clima del planeta.

La temperatura media de la Tierra en la superficie durante el siglo XX, fue de alrededor de 0.6 °C y los escenarios establecen un aumento de la misma en un periodo corto de tiempo.

## **Cronología de eventos relacionados a la disminución de GEI's**

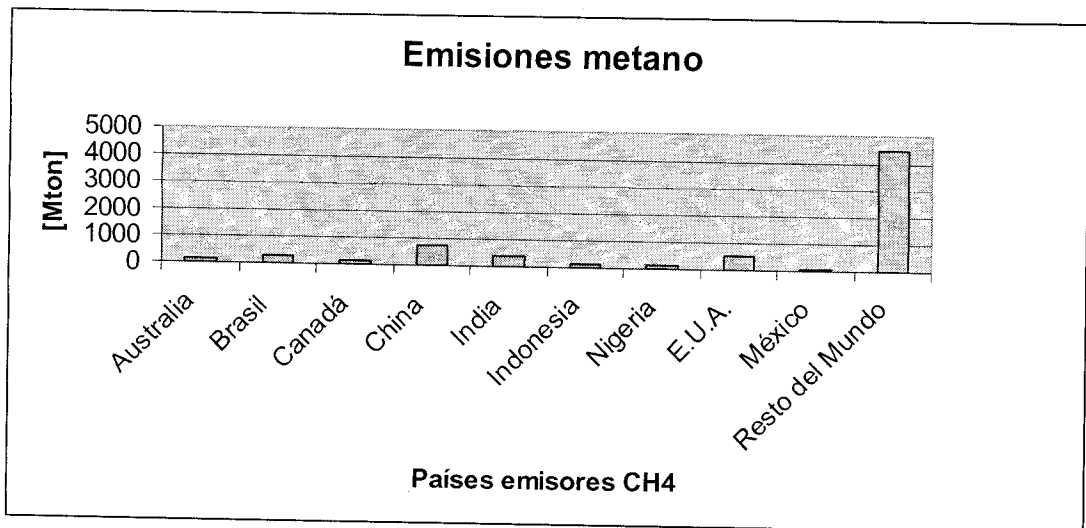
- 1992, Río de Janeiro. La Conferencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Medio Ambiente, adopta la Convención para el Cambio Climático como base para ejecutar acciones correctivas. [23]
- 1997, Kyoto. Se establece un protocolo para que los países reduzcan sus emisiones de GEI. El protocolo establece que una lista de seis gases de efecto invernadero deberán reducirse un 5% por debajo del nivel que se tenía en cada uno de los países involucrados (aplica para países industrializados) en el año de 1990. Esto deberá ser una realidad para el periodo 08 – 12. [2]
- IPCC. En contraste con la anterior medida, se establece que las emisiones deberán reducirse entre un 50 – 70% para estabilizar la temperatura y las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la Tierra para el año 2100. [11]
- 2002, Johannesburgo. La Cumbre Mundial del Desarrollo Sustentable (WSSD) establece la urgente necesidad de utilizar combustibles renovables, así como la reducción en el uso global de la energía. [24]

## **Gases que trata directamente el Protocolo de Kyoto [2]**

1. Dióxido de Carbono
2. Metano
3. Óxido Nitroso
4. Hidrofluorocarbonos
5. Perfluorocarbonos
6. Hexafluoruro de azufre

## **CH<sub>4</sub>, emisiones equivalentes en CO<sub>2</sub>**

Las **emisiones totales** de CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> equivalente, suman un total de **4,501.79 millones de toneladas**. Las principales fuentes de emisión del metano son las emisiones en la producción y transporte del gas natural y los procesos para la obtención del carbón. También se obtienen emisiones de metano en la descomposición de desechos, algunos cultivos.

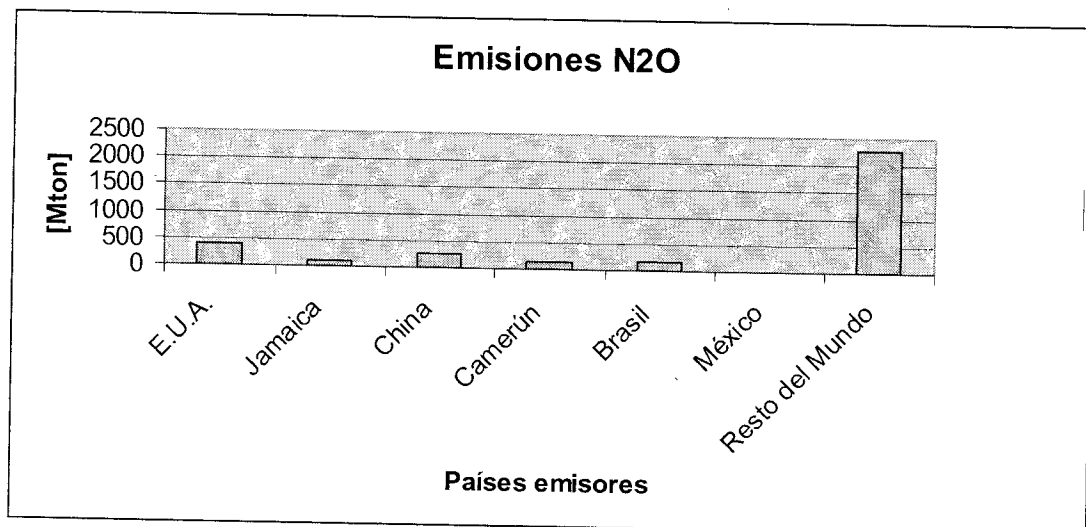


**Gráfica 2.5** Los mayores productores de CH<sub>4</sub> en el mundo, a nivel de emisiones, vuelven a ser Estados Unidos y China. La India se acerca, pero juntos no alcanzan ni la mitad de emisiones de metano globales.

El metano contribuye al calentamiento global, al igual que el CO<sub>2</sub>.

#### N<sub>2</sub>O (emisiones equivalentes en CO<sub>2</sub>)

Las **emisiones totales** de este gas ascienden a **2,279.44 millones de toneladas**. Las principales fuentes de este gas son la agricultura y los procesos industriales.



**Gráfica 2.6** Estados Unidos y China son los máximos exponentes en emisiones de N<sub>2</sub>O a nivel de dióxido de carbono, aún así, ambos están lejos de los parámetros que alcanzan en otros GEI para influenciar considerablemente las emisiones del resto de los países.

## CAPÍTULO TERCERO

### ESTEQUIOMETRÍA

El objetivo de este capítulo es el de cuantificar las emisiones contaminantes de cada uno de los principales combustibles provenientes de los hidrocarburos.

Los principales combustibles analizados son:

- Gasolina [25]
- Diesel [26]
- Turbosina [27]
- Combustóleo [28]
- Biodiesel [29]
- Gasolina 10% etanol (Etanol)
- Coque (Carbón principalmente)
- Gas natural
- Metano
- Etano
- Propano
- Butano
- Metanol
- Etanol

El procedimiento para el análisis de dichos combustibles fue el de hacer reaccionar a estos compuestos químicamente mediante la adición de  $O_2$ . Este tipo de reacciones generan como resultado,  $CO_2 + H_2O$ , suponiendo combustión completa, para todos los casos (a excepción del carbón, ya que no hay hidrógeno disponible para formar agua). Se considera la reacción con  $O_2$ , pues, para los fines de este capítulo, el  $N_2$  del aire no interactúa.

Las evaluaciones para las emisiones de estos compuestos se realizaron para un kilogramo de cada uno de los combustibles.

De acuerdo a la tabla periódica, los pesos atómicos para los elementos constituyentes de estos combustibles, son los siguientes:

- $C = 12$
- $H = 1$
- $O = 16$

Además, se tienen los siguientes pesos moleculares, para cada uno de los compuestos utilizados en el análisis:

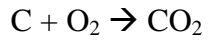
- $\text{Peso compuesto} = \Sigma (\text{peso atómico} \times \text{número de átomos})$



Peso de los compuestos utilizados:

- **Metano:**  $\text{CH}_4 = 12 + 1(4) = 16$  [kg / kgmol]
- **Dióxido de Carbono:**  $\text{CO}_2 = 12 + 16(2) = 44$  [kg / kgmol]
- **Agua:**  $\text{H}_2\text{O} = 1(2) + 16 = 18$  [kg / kgmol]
- **Oxígeno:**  $\text{O}_2 = 2(16) = 32$  [kg / kgmol]
- **Etano:**  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2(12) + 1(6) = 30$  [kg / kgmol]
- **Propano:**  $\text{C}_3\text{H}_8 = 3(12) + 8(1) = 44$  [kg / kgmol]
- **Butano:**  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 4(12) + 10(1) = 58$  [kg / kgmol]
- **Metanol:**  $\text{CH}_3\text{OH} = 12 + 3(1) + 16 + 1 = 32$  [kg / kgmol]
- **Etanol:**  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O} = 2(12) + 6(1) + 16 = 46$  [kg / kgmol]
- **Gasolina:**  $\text{C}_8\text{H}_{18} = 8(12) + 18(1) = 114$  [kg / kgmol]
- **Diesel:**  $\text{C}_{12}\text{H}_{26} = 12(12) + 26(1) = 170$  [kg / kgmol]
- **Combustibles para aviones:**  $\text{C}_{10}\text{H}_{22} = 10(12) + 22(1) = 142$  [kg / kgmol]
- **Combustóleo:**  $\text{C}_7\text{H}_{10} = 7(12) + 10(1) = 94$  [kg / kgmol]
- **Biodiesel:**  $\text{C}_{20}\text{H}_{37}\text{O}_4 = 20(12) + 37(1) + 4(16) = 341$  [kg / kgmol]

## Oxidación del Carbón

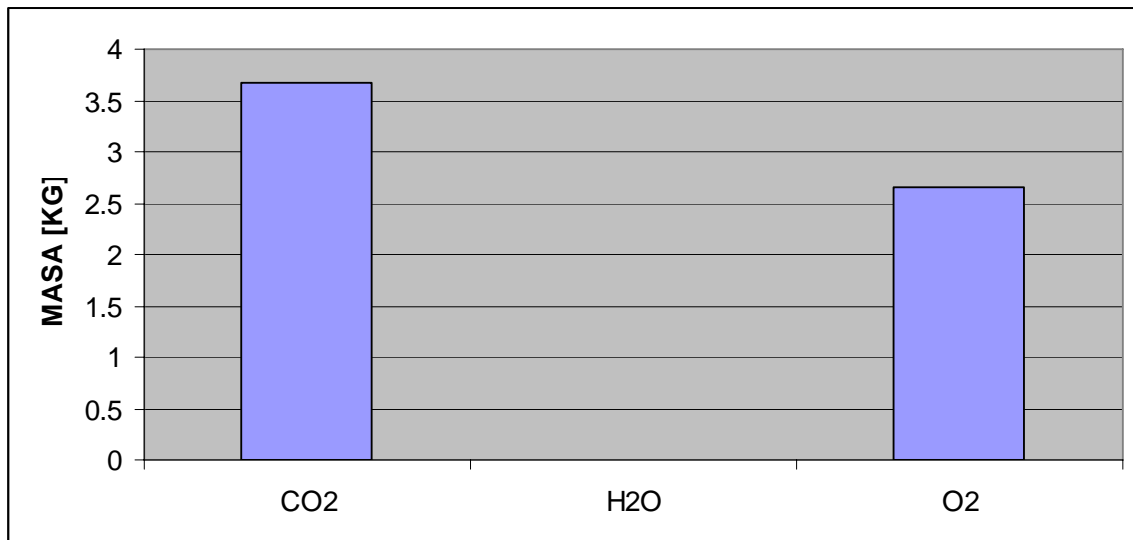


$$1 \text{ kg C} \times \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} \times \frac{44 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kmol CO}_2} =$$

$$= 3.67 \text{ kg CO}_2$$

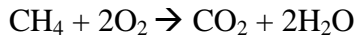
$$1 \text{ kg C} \times \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 2.67 \text{ kg O}_2$$



**Fig. 3.1 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Carbón.**

## Oxidación del Metano



$$1 \text{ kg CH}_4 \times \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{16 \text{ kg CH}_4} \times \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{1 \text{ kmol CH}_4} \times \frac{44 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kmol CO}_2} =$$

$$= 2.75 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg CH}_4 \times \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{16 \text{ kg CH}_4} \times \frac{2 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol CH}_4} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} =$$

$$= 2.25 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg CH}_4 \times \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{16 \text{ kg CH}_4} \times \frac{2 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol CH}_4} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 4 \text{ kg O}_2$$

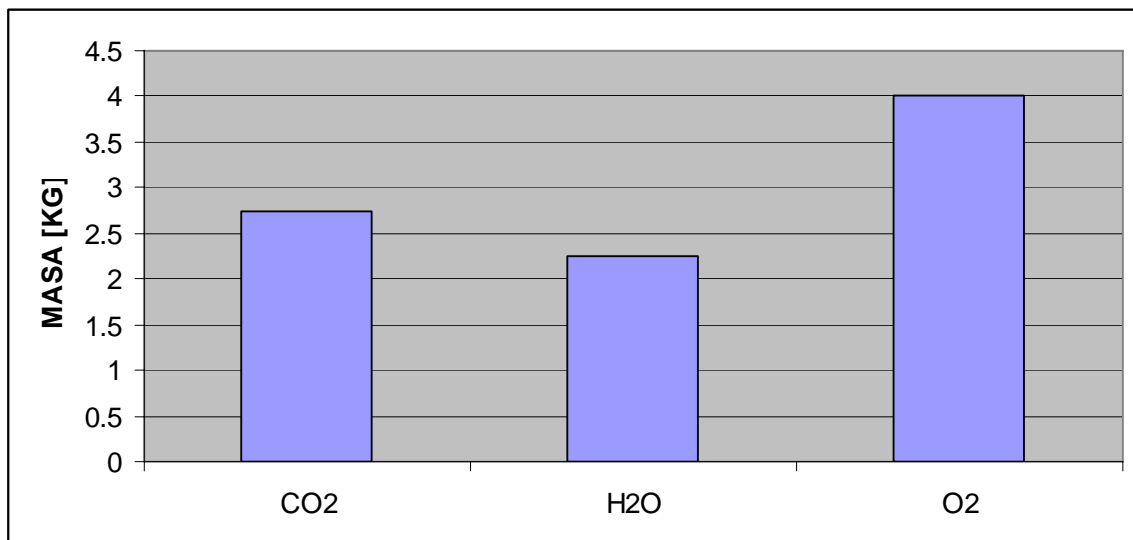
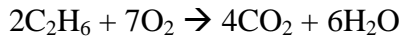


Fig. 3.2 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Metano.

## Oxidación del Etano



$$1 \text{ kg } C_2H_6 \times \frac{1 \text{ kmol } C_2H_6}{30 \text{ kg } C_2H_6} \times \frac{2 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_2H_6} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

$$= 2.94 \text{ kg } CO_2$$

$$1 \text{ kg } C_2H_6 \times \frac{1 \text{ kmol } C_2H_6}{30 \text{ kg } C_2H_6} \times \frac{3 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_2H_6} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

$$= 1.8 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_2H_6 \times \frac{1 \text{ kmol } C_2H_6}{30 \text{ kg } C_2H_6} \times \frac{7 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } C_2H_6} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

$$= 3.74 \text{ kg } O_2$$

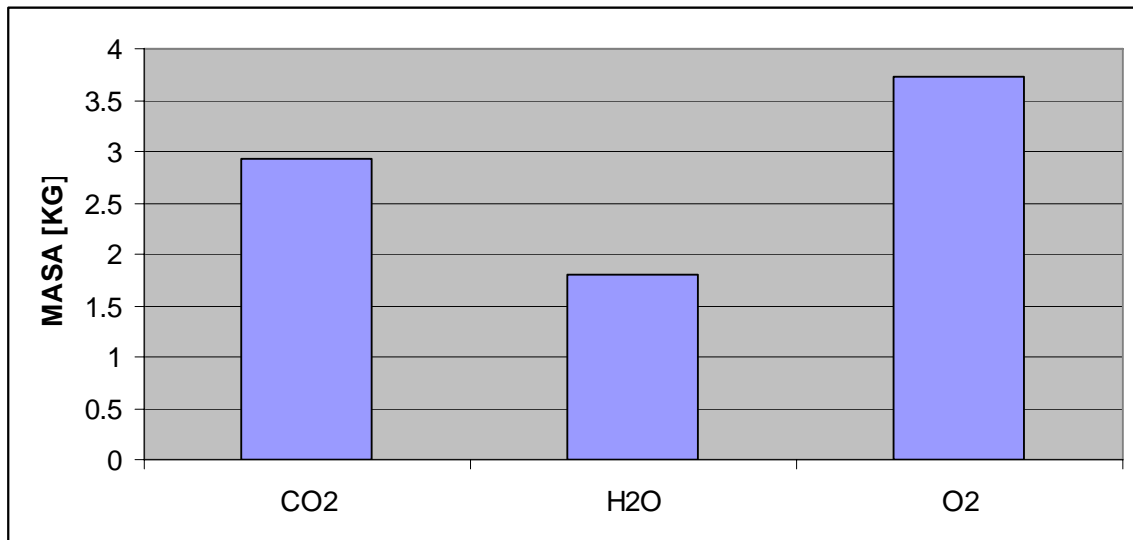
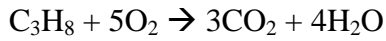


Fig. 3.3 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Etano.

## Oxidación del Propano



$$1 \text{ kg C}_3\text{H}_8 \times \frac{1\text{kmolC}_3\text{H}_8}{44\text{kgC}_3\text{H}_8} \times \frac{3\text{kmolCO}_2}{1\text{kmolC}_3\text{H}_8} \times \frac{44\text{kgCO}_2}{1\text{kmolCO}_2} =$$

$$= 3 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg C}_3\text{H}_8 \times \frac{1\text{kmolC}_3\text{H}_8}{44\text{kgC}_3\text{H}_8} \times \frac{4\text{kmolH}_2\text{O}}{1\text{kmolC}_3\text{H}_8} \times \frac{18\text{kgH}_2\text{O}}{1\text{kmolH}_2\text{O}} =$$

$$= 1.6364 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C}_3\text{H}_8 \times \frac{1\text{kmolC}_3\text{H}_8}{44\text{kgC}_3\text{H}_8} \times \frac{5\text{kmolO}_2}{1\text{kmolC}_3\text{H}_8} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

$$= 3.6364 \text{ kg O}_2$$

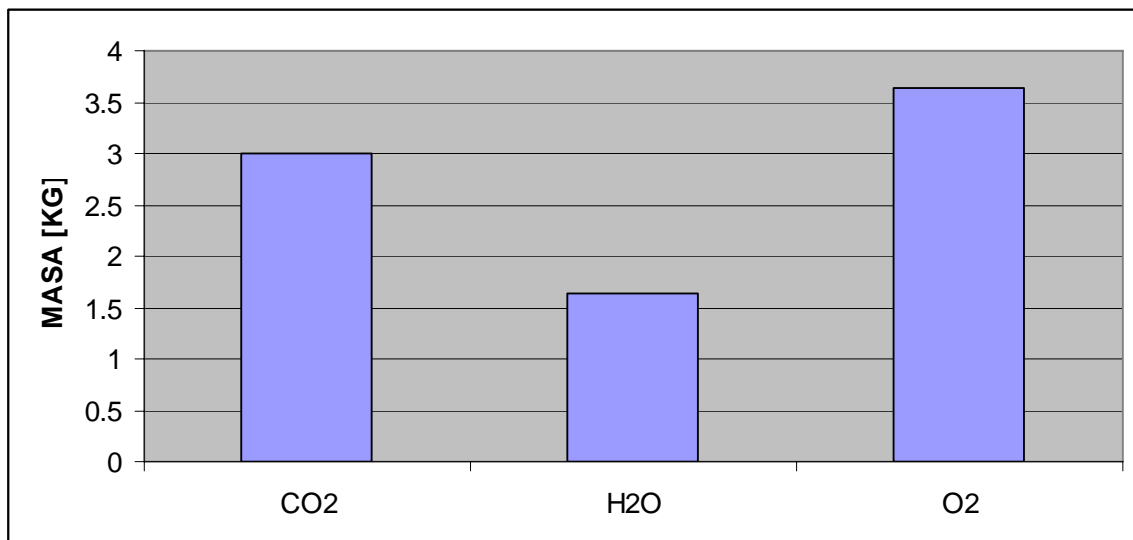


Fig. 3.4 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Propano.

## Oxidación del Butano



$$1 \text{ kg } C_4H_{10} \times \frac{1 \text{ kmol } C_4H_{10}}{58 \text{ kg } C_4H_{10}} \times \frac{4 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_4H_{10}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

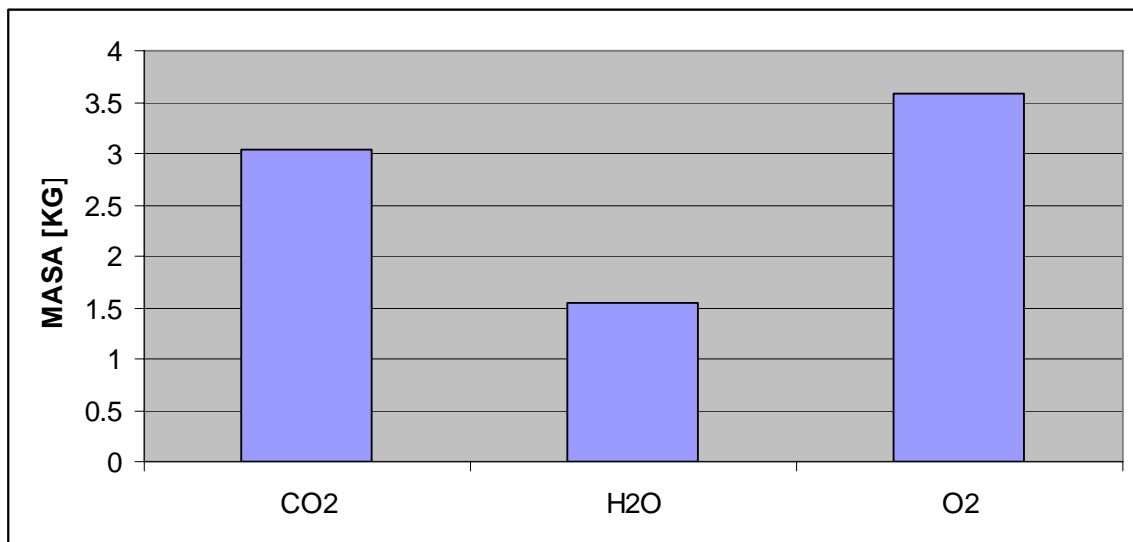
**= 3.0344 kg CO<sub>2</sub>**

$$1 \text{ kg } C_4H_{10} \times \frac{1 \text{ kmol } C_4H_{10}}{58 \text{ kg } C_4H_{10}} \times \frac{5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_4H_{10}} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

**= 1.5517 kg H<sub>2</sub>O**

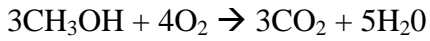
$$1 \text{ kg } C_4H_{10} \times \frac{1 \text{ kmol } C_4H_{10}}{58 \text{ kg } C_4H_{10}} \times \frac{13 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } C_4H_{10}} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

**= 3.5862 kg O<sub>2</sub>**



**Fig. 3.5 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Butano.**

## Oxidación del Metanol



$$1 \text{ kg CH}_3\text{OH} \times \frac{1\text{kmolCH}_3\text{OH}}{32\text{kgCH}_3\text{OH}} \times \frac{1\text{kmolCO}_2}{1\text{kmolCH}_3\text{OH}} \times \frac{44\text{kgCO}_2}{1\text{kmolCO}_2} =$$

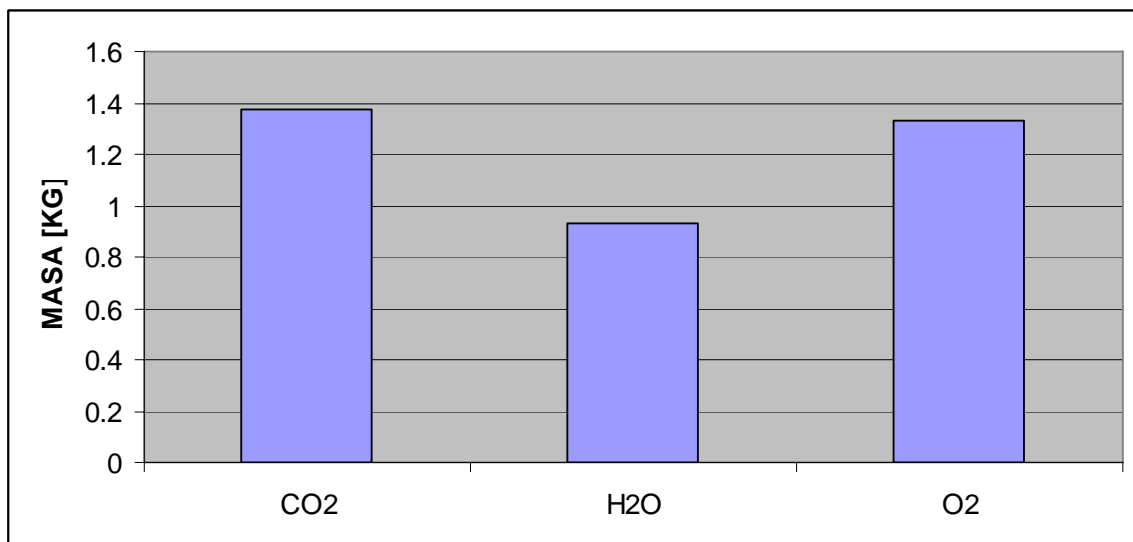
**= 1.375 kg CO<sub>2</sub>**

$$1 \text{ kg CH}_3\text{OH} \times \frac{1\text{kmolCH}_3\text{OH}}{32\text{kgCH}_3\text{OH}} \times \frac{5\text{kmolH}_2\text{O}}{3\text{kmolCH}_3\text{OH}} \times \frac{18\text{kgH}_2\text{O}}{1\text{kmolH}_2\text{O}} =$$

**= 0.9375 kg H<sub>2</sub>O**

$$1 \text{ kg CH}_3\text{OH} \times \frac{1\text{kmolCH}_3\text{OH}}{32\text{kgCH}_3\text{OH}} \times \frac{4\text{kmolO}_2}{3\text{kmolCH}_3\text{OH}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

**= 1.3334 kg O<sub>2</sub>**



**Fig. 3.6 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Metanol.**

## Oxidación del Etanol



$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6\text{O}}{46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}} \times \frac{2 \text{ kmol CO}_2}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6\text{O}} \times \frac{44 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kmol CO}_2} =$$

$$= 1.913 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6\text{O}}{46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}} \times \frac{3 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6\text{O}} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} =$$

$$= 1.1739 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6\text{O}}{46 \text{ kg C}_2\text{H}_6\text{O}} \times \frac{3 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 2.0869 \text{ kg O}_2$$

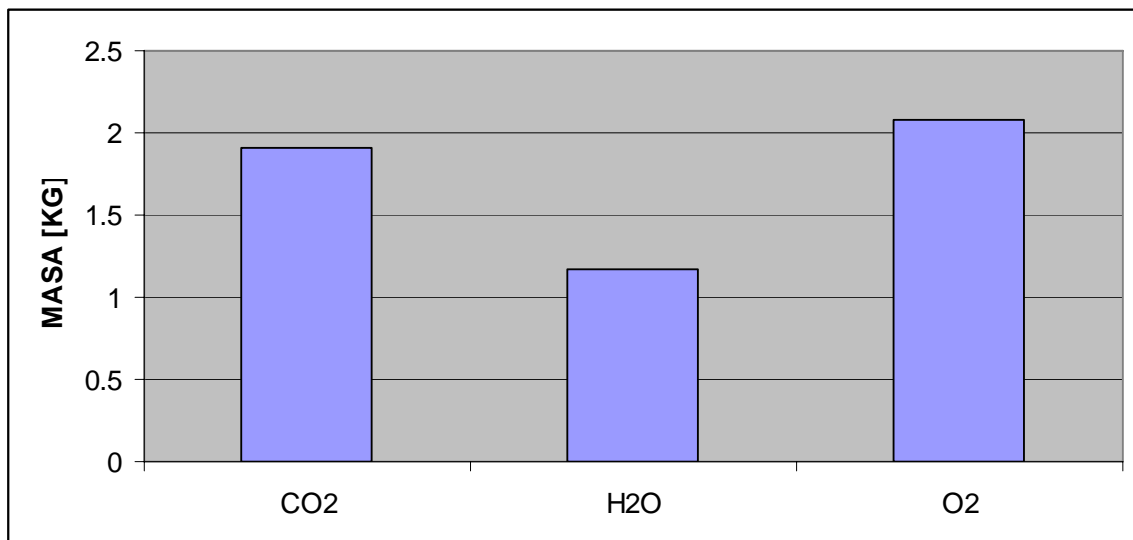
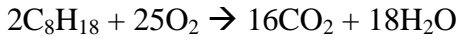


Fig. 3.7 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Etanol.



### Oxidación de la Gasolina Comercial



$$1 \text{ kg } C_8H_{18} \times \frac{1 \text{ kmol } C_8H_{18}}{114 \text{ kg } C_8H_{18}} \times \frac{8 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_8H_{18}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

$$= 3.0877 \text{ kg } CO_2$$

$$1 \text{ kg } C_8H_{18} \times \frac{1 \text{ kmol } C_8H_{18}}{114 \text{ kg } C_8H_{18}} \times \frac{9 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_8H_{18}} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

$$= 1.421 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_8H_{18} \times \frac{1 \text{ kmol } C_8H_{18}}{114 \text{ kg } C_8H_{18}} \times \frac{25 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } C_8H_{18}} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

$$= 3.5087 \text{ kg } O_2$$

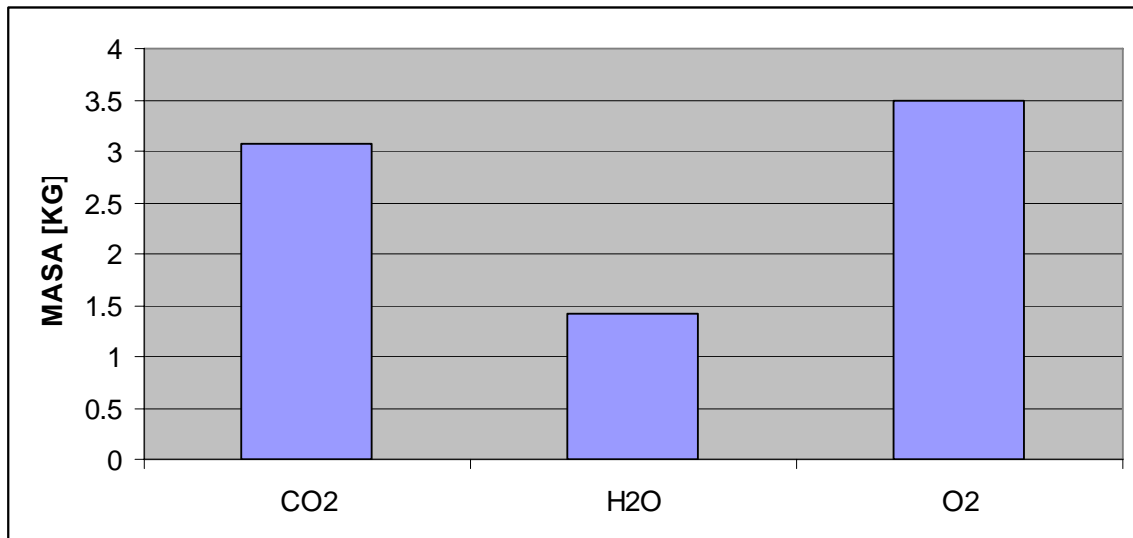


Fig. 3.8 Masa de los compuestos producto de la oxidación de la Gasolina Comercial.

## Oxidación del Diesel



$$1 \text{ kg } C_{12}H_{26} \times \frac{1 \text{ kmol } C_{12}H_{26}}{170 \text{ kg } C_{12}H_{26}} \times \frac{12 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_{12}H_{26}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

$$= 3.1058 \text{ kg } CO_2$$

$$1 \text{ kg } C_{12}H_{26} \times \frac{1 \text{ kmol } C_{12}H_{26}}{170 \text{ kg } C_{12}H_{26}} \times \frac{13 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_{12}H_{26}} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

$$= 1.3764 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_{12}H_{26} \times \frac{1 \text{ kmol } C_{12}H_{26}}{170 \text{ kg } C_{12}H_{26}} \times \frac{37 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } C_{12}H_{26}} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

$$= 3.4823 \text{ kg } O_2$$

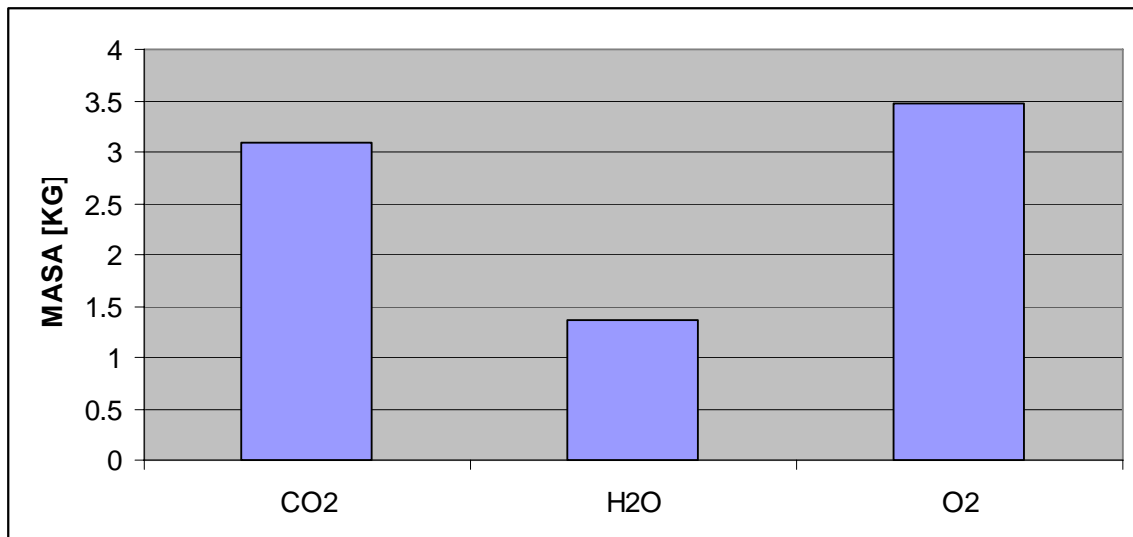


Fig. 3.9 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Diesel.

### Oxidación del Combustible Aéreo, base de Keroseno



$$1 \text{ kg } C_{10}H_{22} \times \frac{1 \text{ kmol } C_{10}H_{22}}{142 \text{ kg } C_{10}H_{22}} \times \frac{10 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_{10}H_{22}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

$$= 3.0985 \text{ kg } CO_2$$

$$1 \text{ kg } C_{10}H_{22} \times \frac{1 \text{ kmol } C_{10}H_{22}}{142 \text{ kg } C_{10}H_{22}} \times \frac{11 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_{10}H_{22}} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

$$= 1.3943 \text{ kg } H_2O$$

$$1 \text{ kg } C_{10}H_{22} \times \frac{1 \text{ kmol } C_{10}H_{22}}{142 \text{ kg } C_{10}H_{22}} \times \frac{31 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } C_{10}H_{22}} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

$$= 3.4929 \text{ kg } O_2$$

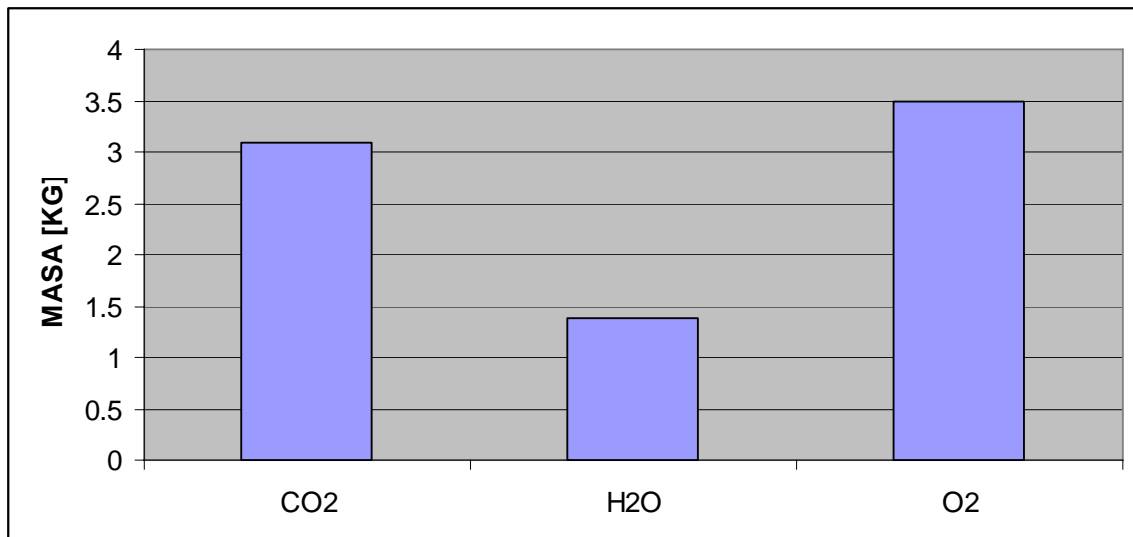
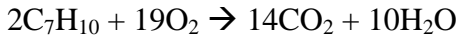


Fig. 3.10 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Combustible Aéreo, base Keroseno.

### Oxidación del Combustóleo



$$1 \text{ kg } C_7H_{10} \times \frac{1 \text{ kmol } C_7H_{10}}{94 \text{ kg } C_7H_{10}} \times \frac{7 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_7H_{10}} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

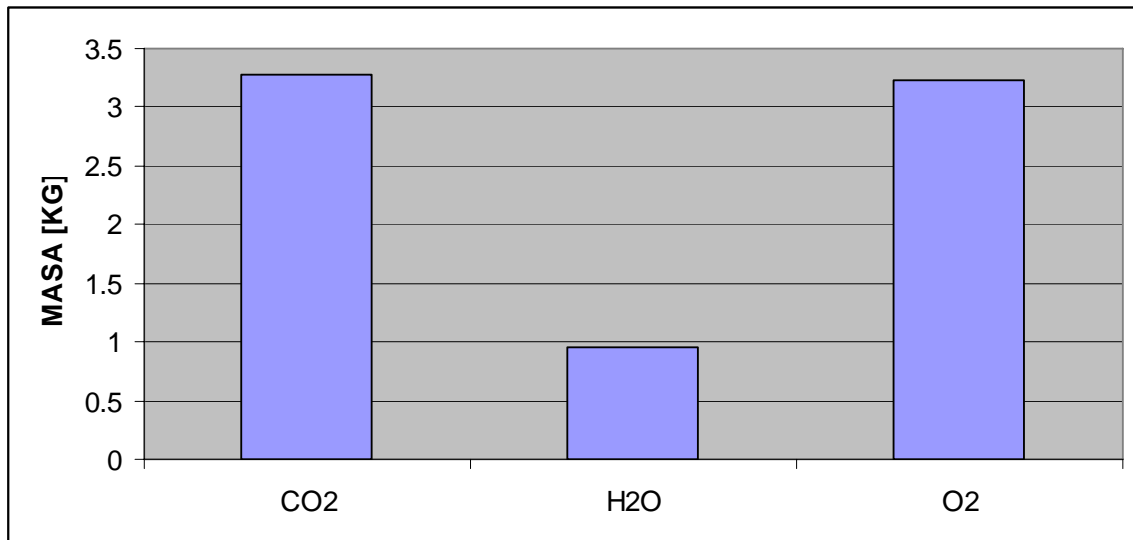
**= 3.2765 kg CO<sub>2</sub>**

$$1 \text{ kg } C_7H_{10} \times \frac{1 \text{ kmol } C_7H_{10}}{94 \text{ kg } C_7H_{10}} \times \frac{5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol } C_7H_{10}} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

**= 0.9574 kg H<sub>2</sub>O**

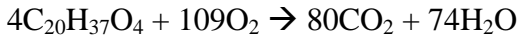
$$1 \text{ kg } C_7H_{10} \times \frac{1 \text{ kmol } C_7H_{10}}{94 \text{ kg } C_7H_{10}} \times \frac{19 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } C_7H_{10}} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

**= 3.234 kg O<sub>2</sub>**



**Fig. 3.11 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Combustóleo.**

### Oxidación del Biodiesel, Base a Partir de Soya



$$1 \text{ kg } C_{20}H_{37}O_4 \times \frac{1 \text{ kmol } C_{20}H_{37}O_4}{341 \text{ kg } C_{20}H_{37}O_4} \times \frac{20 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol } C_{20}H_{37}O_4} \times \frac{44 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} =$$

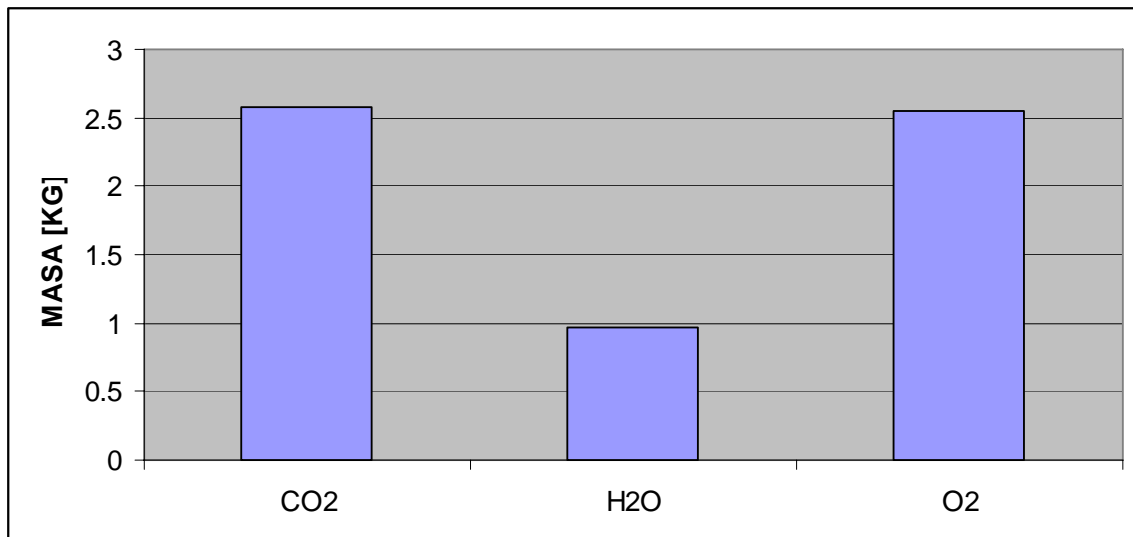
**= 2.5806 kg CO<sub>2</sub>**

$$1 \text{ kg } C_{20}H_{37}O_4 \times \frac{1 \text{ kmol } C_{20}H_{37}O_4}{341 \text{ kg } C_{20}H_{37}O_4} \times \frac{37 \text{ kmol } H_2O}{2 \text{ kmol } C_{20}H_{37}O_4} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} =$$

**= 0.9765 kg H<sub>2</sub>O**

$$1 \text{ kg } C_{20}H_{37}O_4 \times \frac{1 \text{ kmol } C_{20}H_{37}O_4}{341 \text{ kg } C_{20}H_{37}O_4} \times \frac{109 \text{ kmol } O_2}{4 \text{ kmol } C_{20}H_{37}O_4} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} =$$

**= 2.5571 kg O<sub>2</sub>**



**Fig. 3.12 Masa de los compuestos producto de la oxidación del Biodiesel, base Soya.**

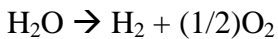
**Oxidación del Gasohol (Mezcla Gasolina 90%, Etanol 10%, (Véase oxidación del Etanol)**

**Oxidación del Coque (Véase oxidación del Carbón)**

**Oxidación del Gas Natural (Véase oxidación del Metano)**

Al producirse agua debido a la oxidación del combustible, ésta necesita de una cierta cantidad de O<sub>2</sub> para existir propiamente como una molécula.

El oxígeno utilizado por la molécula de agua, se obtuvo:



**Para el Metano**

$$2.25 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

**= 2 kg O<sub>2</sub>**

**Para el Etano**

$$1.8 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

**= 1.6 kg O<sub>2</sub>**

**Para el Propano**

$$1.6364 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

**= 1.4545 kg O<sub>2</sub>**

**Para el Butano**

$$1.5517 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 1.3792 \text{ kg O}_2$$

**Para el Metanol**

$$0.9375 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 0.834 \text{ kg O}_2$$

**Para el Etanol**

$$1.1739 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 1.0434 \text{ kg O}_2$$

**Para la Gasolina Comercial**

$$1.421 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 1.2631 \text{ kg O}_2$$

**Para el Diesel**

$$1.3764 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

$$= 1.2234 \text{ kg O}_2$$

**Para el Combustible Aéreo, Base Keroseno**

$$1.3943 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

$$= 1.2393 \text{ kg O}_2$$

**Para el Combustóleo**

$$0.9574 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

$$= 0.851 \text{ kg O}_2$$

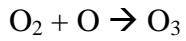
**Para el Biodiesel, Base Soya**

$$0.9765 \text{ kg H}_2\text{O} \times \frac{1\text{kmolH}_2\text{O}}{18\text{kgH}_2\text{O}} \times \frac{(1/2)\text{kmolO}_2}{1\text{kmolH}_2\text{O}} \times \frac{32\text{kgO}_2}{1\text{kmolO}_2} =$$

$$= 0.868 \text{ kg O}_2$$



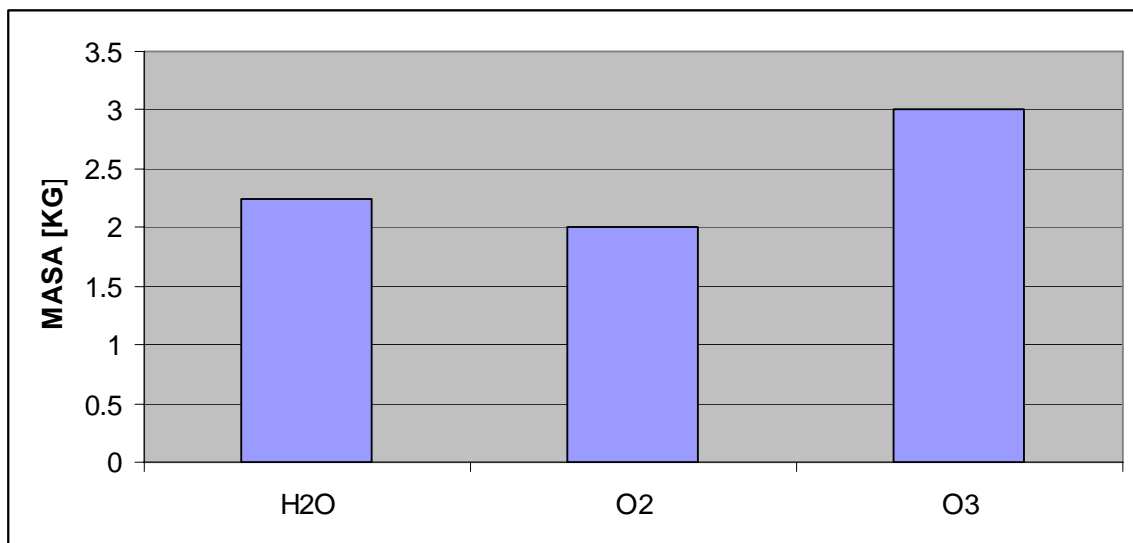
De acuerdo con la reacción de Mario Molina para la producción de Ozono, se obtuvo lo siguiente:



**Para el Metano**

$$2 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 3 \text{ kg O}_3$$

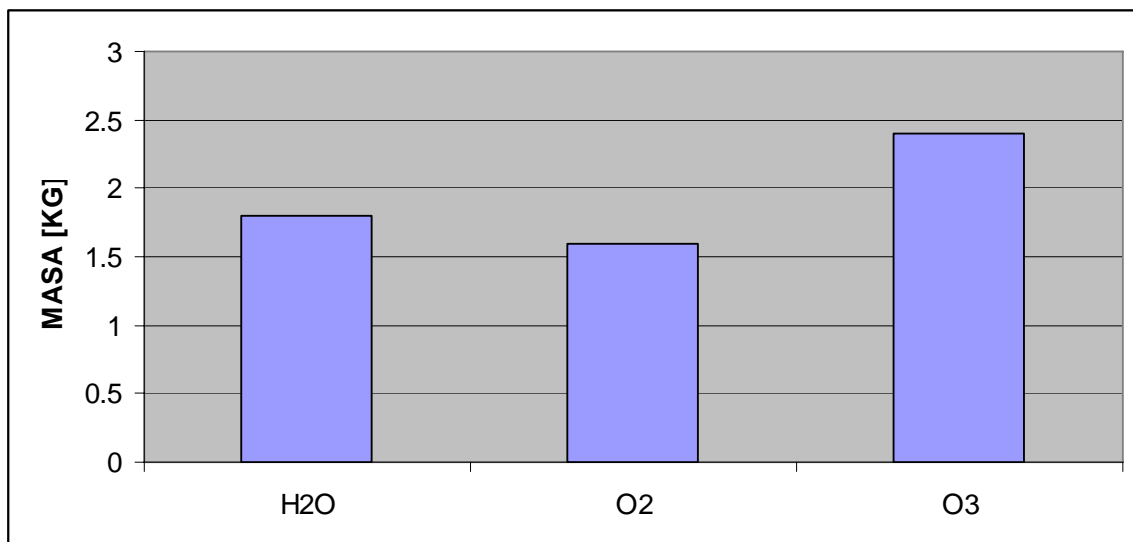


**Fig. 3.13 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Metano. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de Metano.**

**Para el Etano**

$$1.6 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 2.4 \text{ kg O}_3$$

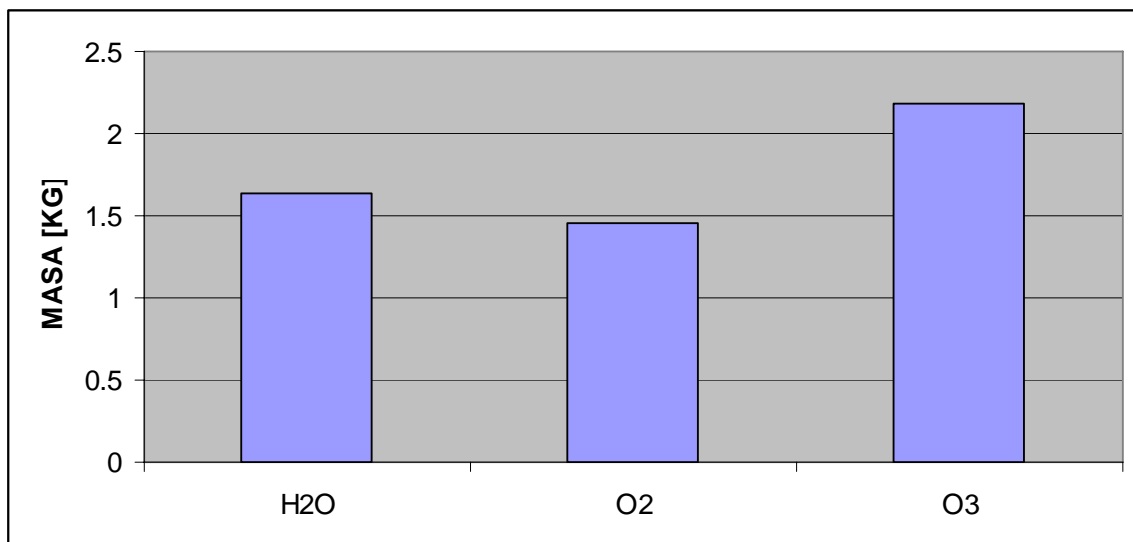


**Fig. 3.14 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Etano. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de Etano.**

**Para el Propano**

$$1.4545 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 2.1817 \text{ kg O}_3$$

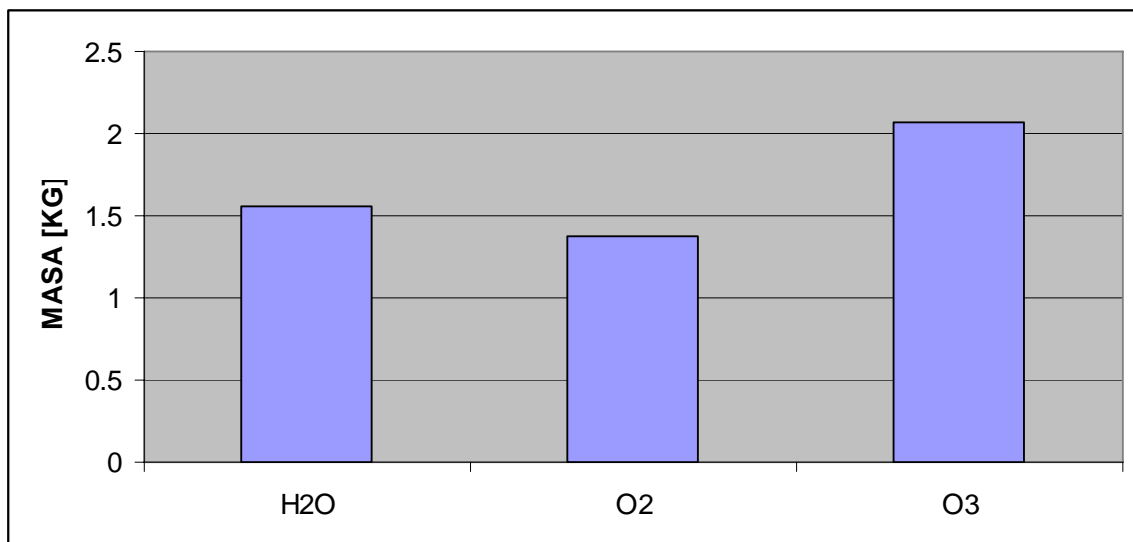


**Fig. 3.15 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Propano. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de Propano.**

**Para el Butano**

$$1.3792 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 2.0688 \text{ kg O}_3$$

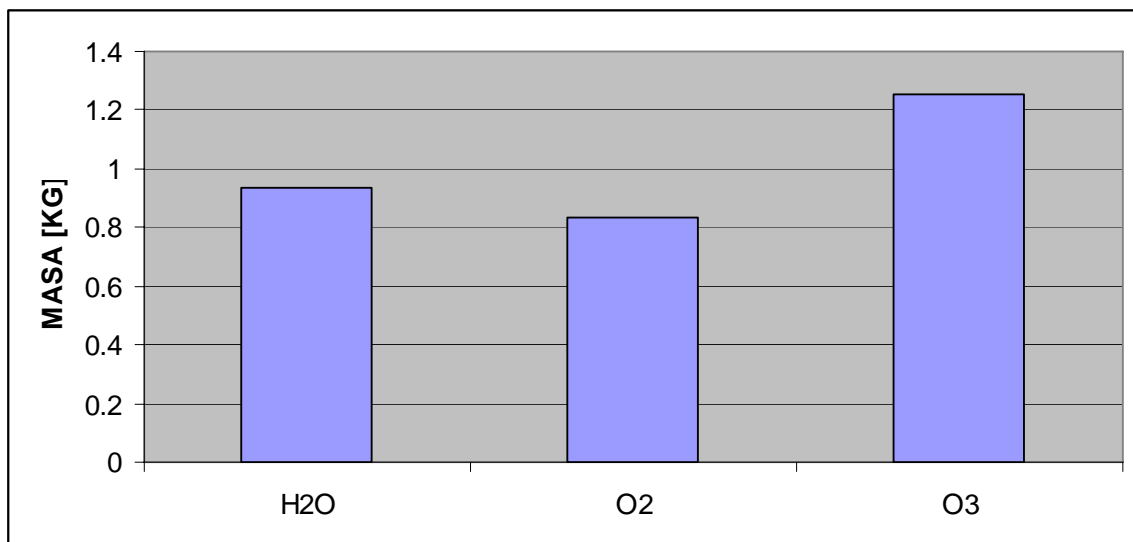


**Fig. 3.16 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Butano. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de Butano.**

**Para el Metanol**

$$0.834 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.251 \text{ kg O}_3$$

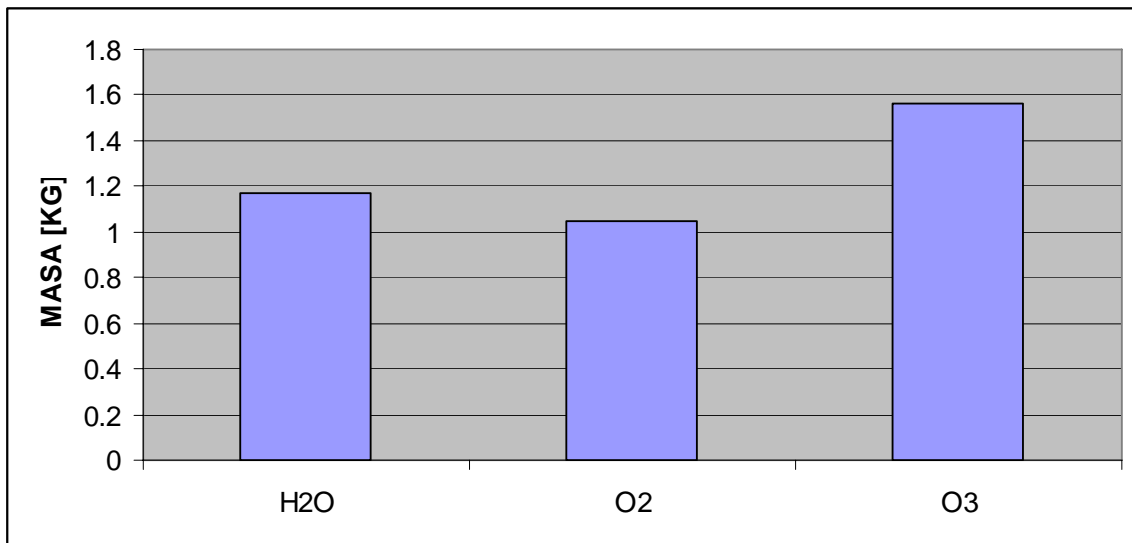


**Fig. 3.17 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Metanol. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de Metanol.**

**Para el Etanol**

$$1.0434 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.5651 \text{ kg O}_3$$

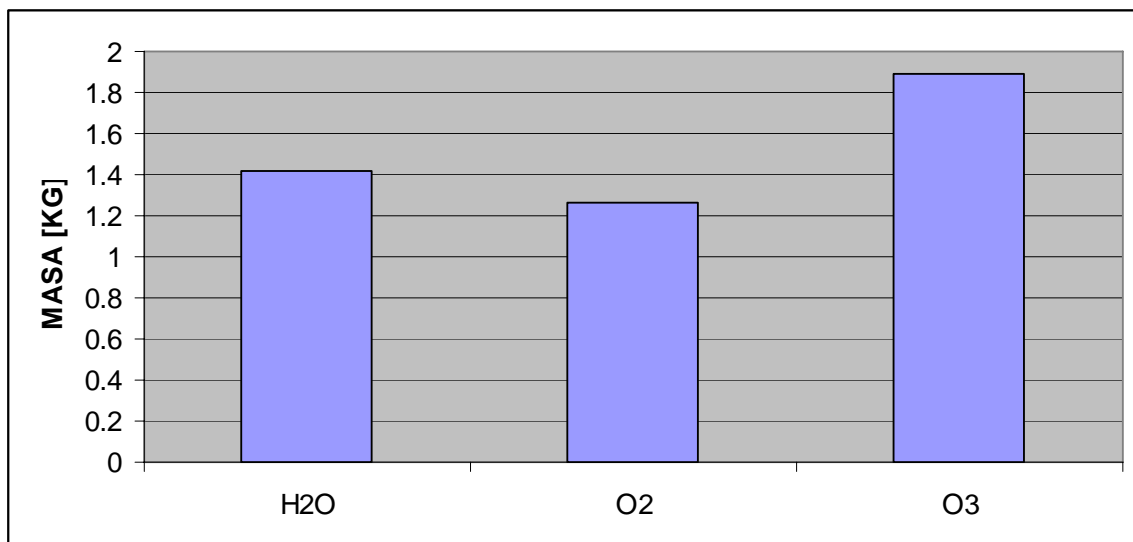


**Fig. 3.18 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Etanol. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de Etanol.**

**Para la Gasolina Comercial**

$$1.2631 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.8946 \text{ kg O}_3$$

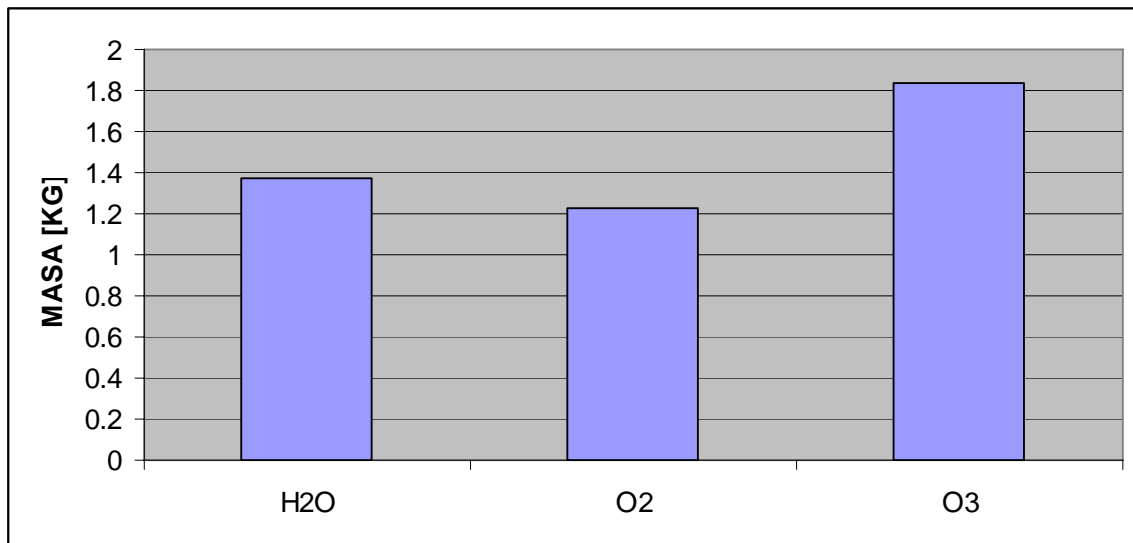


**Fig. 3.19 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación de la Gasolina. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de la Gasolina.**

Para el Diesel

$$1.2234 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.8351 \text{ kg O}_3$$



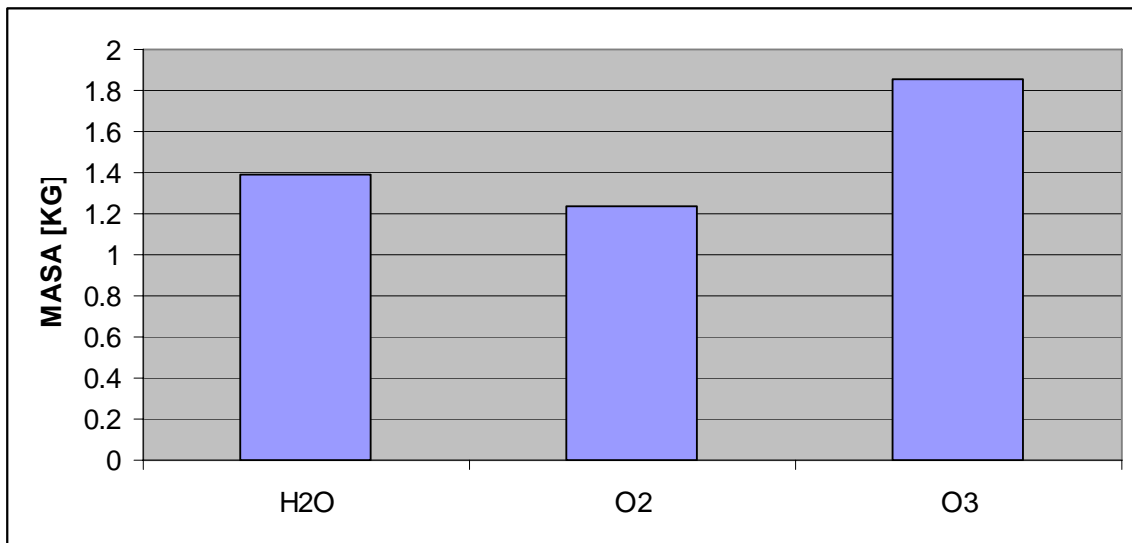
**Fig. 3.20** Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Diesel. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación del Diesel



**Para el Combustible Aéreo, Base Keroseno**

$$1.2393 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.8589 \text{ kg O}_3$$

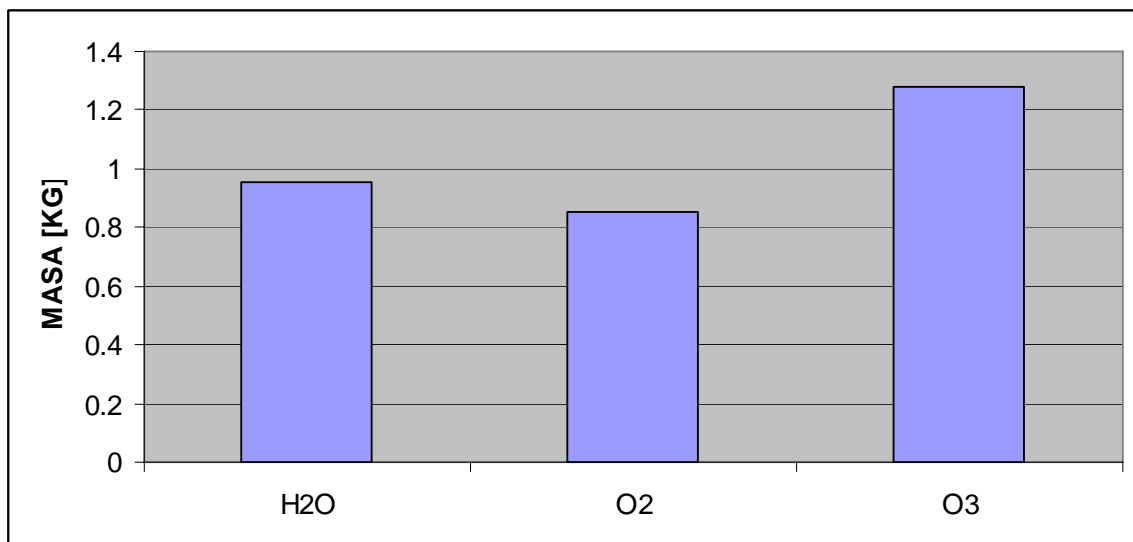


**Fig. 3.21 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Keroseno. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación del Keroseno.**

Para el Combustóleo

$$0.851 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.2765 \text{ kg O}_3$$

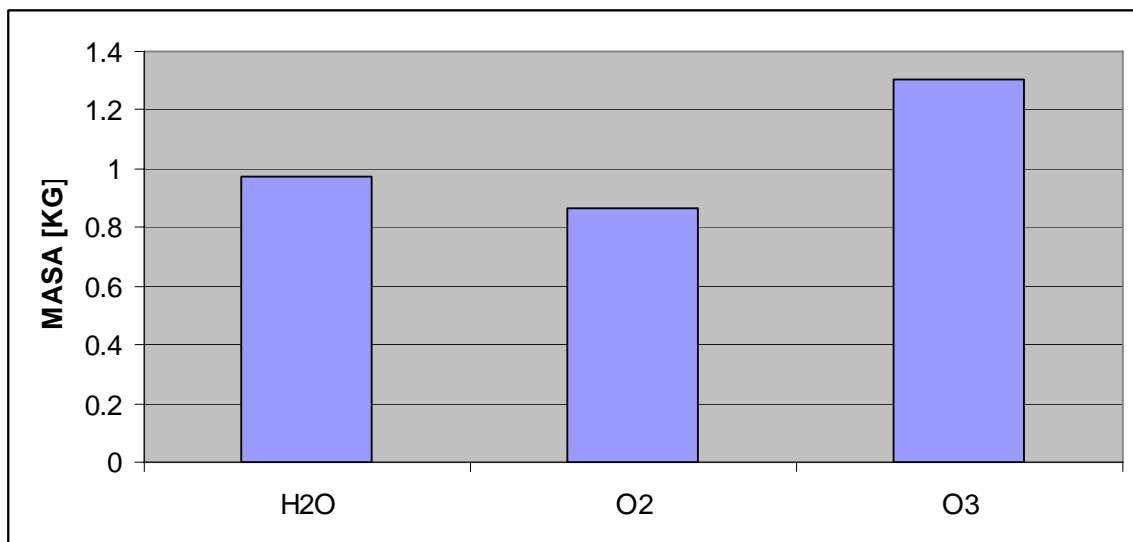


**Fig. 3.22 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Combustóleo. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación del Combustóleo.**

### Para el Biodiesel, Base Soya

$$0.868 \text{ kg O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{1 \text{ kmol O}_3}{1 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 1.302 \text{ kg O}_3$$



**Fig. 3.23 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación del Biodiesel. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación del Biodiesel.**

Cabe aclarar que la reacción utilizada para la formación del ozono, aplica solamente bajo ciertas condiciones atmosféricas, específicamente los rayos UV, que generan una reacción fotoquímica.

El factor energía se refiere a las condiciones de la luz UV a una altura específica de la baja atmósfera, ya que no ocurre el mismo fenómeno a alturas estratosféricas, que a nivel atmósfera.

## Toneladas de petróleo

La producción de barriles destinados a los productos del petróleo, aplicada a los analizados en este capítulo, es:

1. Gasolina
2. Turbosina
3. Diesel
4. Combustóleo
5. Coque

La gasolina se considera un destilado ligero de petróleo, el diesel y la turbosina son destilados intermedios y el combustóleo se clasifica aparte de las anteriores, así como el coque de petróleo.

Según el American Petroleum Institute [30], la unidad para medir el petróleo es el barril, el cual equivale a:

- 1 barril = 42 galones
- 42 gal = 158.98 litros

La densidad promedio del petróleo, de acuerdo a [33], es de  $\rho = 0.8 \frac{g}{ml}$ , valor necesario para calcular:

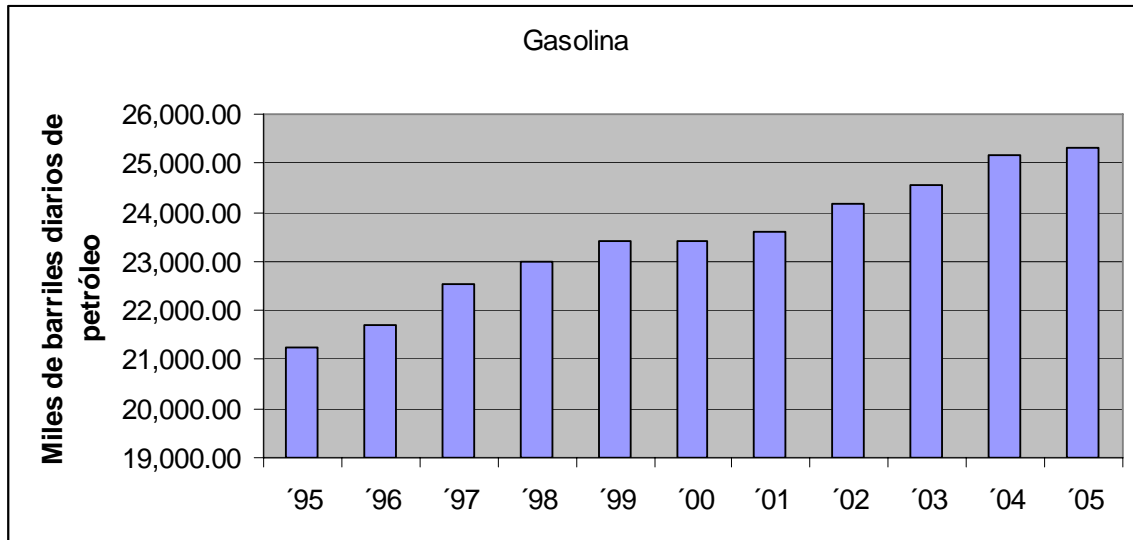
→  $m = \rho V$ , de donde **m = masa;  $\rho$  = densidad; V = volumen.**

$$\rightarrow m = (800 \frac{kg}{ml})(158.98l)(1000 \frac{ml}{l})$$

$$\rightarrow m = 127.184 \text{ kg}$$

Para los cálculos realizados se consideró que los destilados y los otros, son en su mayoría los valores para los combustibles mencionados, por lo que los valores utilizados para cada uno de ellos, fueron los mismos que aparecen en las tablas de la Secretaría de Energía. [31]

**Para la gasolina**



**Fig. 3.24 Producción mundial de gasolina en la década 1995 - 2005**

De acuerdo a las cifras obtenidas en este capítulo, se tiene que:

*Gasolina: 258,100 barriles [31]*

*Miles de toneladas producidas: 32.826*

$$32.826 \text{ [mton]} \text{ C}_8\text{H}_{18} \times \frac{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}}{114 \text{ kg C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{9 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} =$$

$$= 46.648 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O}$$

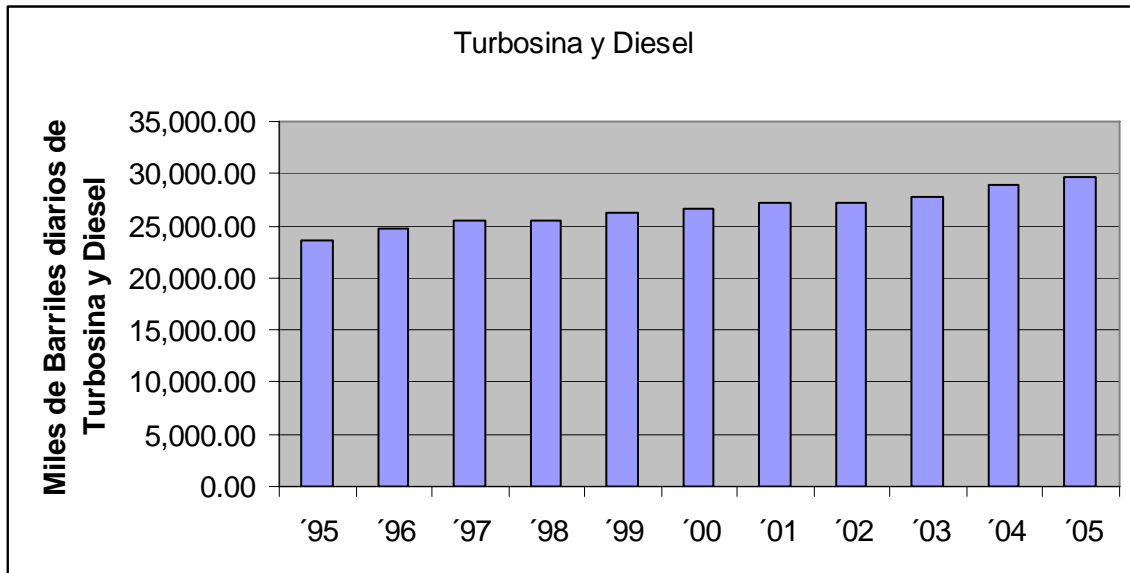
$$46.648 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 41.465 \text{ [mton]} \text{ O}_2$$

$$41.465 \text{ [mton]} \text{ O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{2 \text{ kmol O}_3}{3 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 62.197 \text{ [mton]} \text{ O}_3$$

**Para la Turbosina y el Diesel**



**Fig. 3.25 Producción mundial de Turbosina y Diesel en la década 1995 - 2005**

De acuerdo a las cifras obtenidas en este capítulo, se tiene que:

*Turbosina y Diesel: 292,647 barriles [31]*

*Miles de toneladas producidas: 37.22*

$$37.22 \text{ [mton]} \text{ C}_8\text{H}_{18} \times \frac{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}}{114 \text{ kg C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{9 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} =$$

$$= 52.892 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O}$$

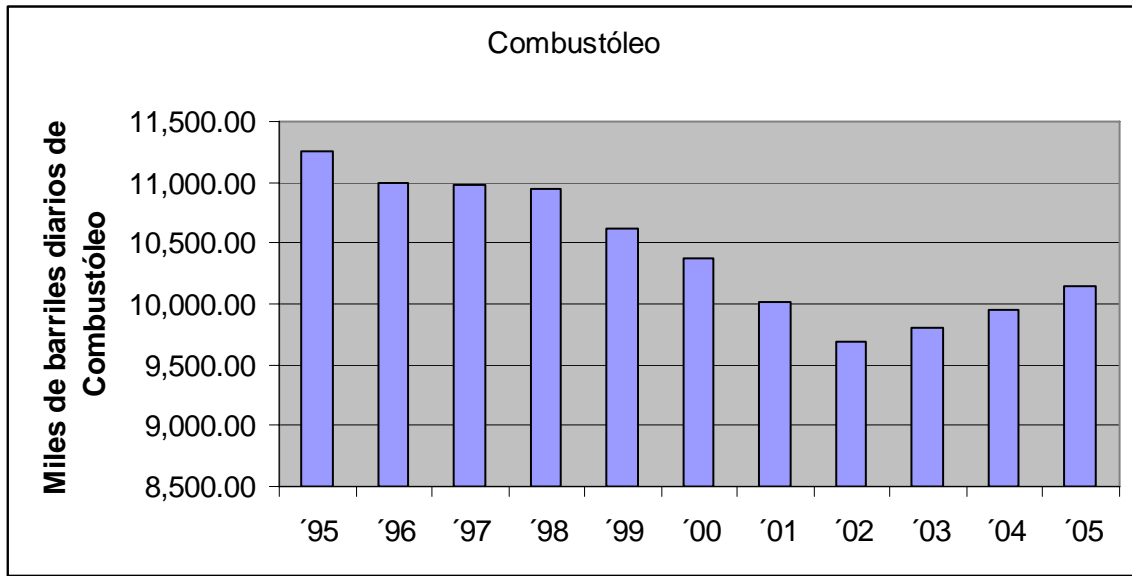
$$52.892 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 47.015 \text{ [mton]} \text{ O}_2$$

$$47.015 \text{ [mton]} \text{ O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{2 \text{ kmol O}_3}{3 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 70.522 \text{ [mton]} \text{ kg O}_3$$

**Para el Combustóleo**



**Fig. 3.26 Producción mundial de Combustóleo en la década 1995 - 2005**

De acuerdo a las cifras obtenidas en este capítulo, se tiene que:

*Combustóleo: 114,768 barriles [31]*

*Miles de toneladas producidas: 14.59*

$$14.59 \text{ [mton]} \text{ C}_8\text{H}_{18} \times \frac{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}}{114 \text{ kg C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{9 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} =$$

$$= \mathbf{20.743 \text{ [mton]} H}_2\text{O}$$

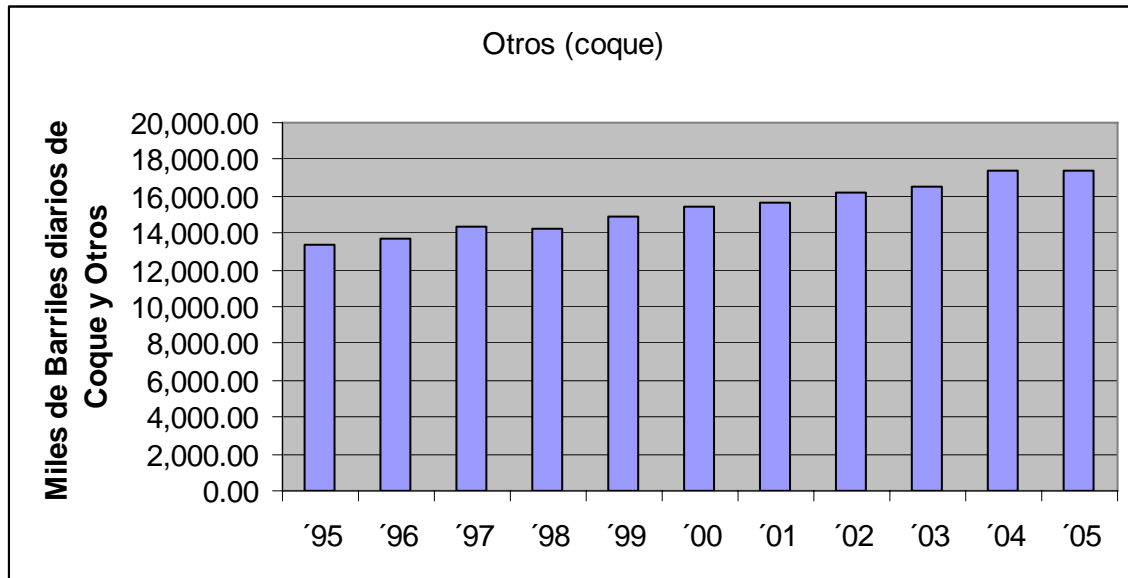
$$20.743 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= \mathbf{18.438 \text{ [mton]} O}_2$$

$$18.438 \text{ [mton]} \text{ O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{2 \text{ kmol O}_3}{3 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= \mathbf{27.657 \text{ [mton]} kg O}_3$$

## Para el Coque



**Fig. 3.27 Producción mundial de Coque y Otros Combustibles en la década 1995 - 2005**

De acuerdo a las cifras obtenidas en este capítulo, se tiene que:

Coque y Otros: 169,063 barriles [31]  
Miles de toneladas producidas: 21.49

$$21.49 \text{ [mton]} \text{ C}_8\text{H}_{18} \times \frac{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}}{114 \text{ kg C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{9 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol C}_8\text{H}_{18}} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} =$$

$$= 30.551 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O}$$

$$30.551 \text{ [mton]} \text{ H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{(1/2) \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{32 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kmol O}_2} =$$

$$= 27.156 \text{ [mton]} \text{ O}_2$$

$$27.156 \text{ [mton]} \text{ O}_2 \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \times \frac{2 \text{ kmol O}_3}{3 \text{ kmol O}_2} \times \frac{48 \text{ kg O}_3}{1 \text{ kmol O}_3} =$$

$$= 40.734 \text{ [mton]} \text{ O}_3$$



**TOTAL : 201.09 [mileston] O<sub>3</sub>**

Este valor representa la cantidad de ozono no generado en la última década, a nivel global, como consecuencia de la oxidación de los combustibles analizados en el presente trabajo.

## CAPÍTULO 4

### Análisis de resultados

El objetivo de este capítulo es el identificar los efectos que generan cada uno de los combustibles analizados, así como también, identificar cuantitativamente estos efectos en el medio ambiente mundial.

#### Primera parte: Generación de CO<sub>2</sub> y Agua como emisiones

En esta primera parte se revisó la estequiometría de más de una decena de combustibles, siendo estos los de más frecuente uso por el hombre, en transporte e industria, principalmente.

Los resultados fueron variados dentro de un régimen similar a cada uno de los combustibles, puntualmente, se tiene que el **carbón** es el combustible que más dióxido de carbono aporta a la atmósfera terrestre, a nivel de emisiones que producen y fomentan el efecto invernadero, en un parámetro mayor al que puede transformar y asimilar la atmósfera sin sufrir las consecuencias del calentamiento global.

Un solo kilogramo de **carbón**, al oxidarse, genera masas superiores a los tres kilos y medio de emisiones de dióxido de carbono, lo cual se traduce en una producción de más del triple de la masa original de combustible, de CO<sub>2</sub>, valor muy superior a los demás combustibles. [Gráfica 3.1]

Si se traduce este análisis a toneladas generadas, se tiene un exceso de generación de CO<sub>2</sub> a nivel mundial, teniendo en cuenta que el carbón no es el combustible de mayor uso, pero si el máximo generador de dióxido de carbono.

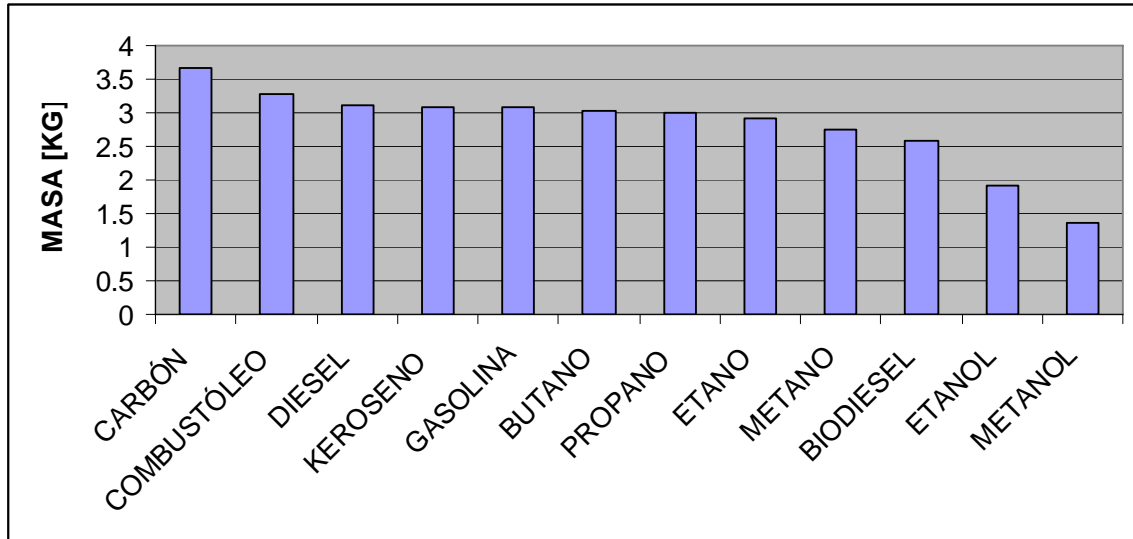
Por otra parte, se tiene que para el **keroseno**, el **diesel**, el **combustóleo** y la **gasolina**, los valores de generación de emisiones de dióxido de carbono también son elevados en relación a la cantidad másica de combustible que se oxida, ya que la media producida para estos casos se encuentra en valores cercanos al triple de la masa de combustible, generando CO<sub>2</sub>, por cada kilogramo de estos combustibles que se oxida. [Gráficas 3.8-3.11]

**Combustibles bajos en generación de dióxido de carbono.** El **butano**, **propano**, **etano** y **metano**, son derivados del petróleo que al igual que los demás, generan emisiones considerables de CO<sub>2</sub>, sin embargo, la media para sus emisiones contaminantes se encuentra por debajo del triple de la masa original oxidada de cada combustible, lo que los hace una mejor opción para su uso preferente con respecto a los anteriores. [Gráficas 3.2-3.5]

**Combustibles limpios.** Los combustibles analizados de emisiones bajas o mínimas de dióxido de carbono, son el **biodiesel** y los alcoholes, **etanol** y **metanol**, los cuales generan una media de aproximadamente el doble de producción de CO<sub>2</sub>, respecto a la

masa original del combustible oxidado, lo cual los transforma en la mejor opción dentro de los combustibles fósiles para reducir las emisiones de efecto invernadero de una manera considerable, sin embargo son de los combustibles menos utilizados en la industria del transporte y general. [Gráficas 3.6-3.7, 3.12]

La masa producida de CO<sub>2</sub> tiende a disminuir conforme aumenta la proporción de H<sub>2</sub> en el combustible, convirtiendo la diferencia de CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O, como se demuestra a continuación.



**Fig. 4.1 Masa del CO<sub>2</sub> obtenida con la oxidación de 1 [kg] de cada uno de los combustibles analizados.**

Para el caso de las emisiones de agua producto de la oxidación de los combustibles analizados, se tiene lo siguiente:

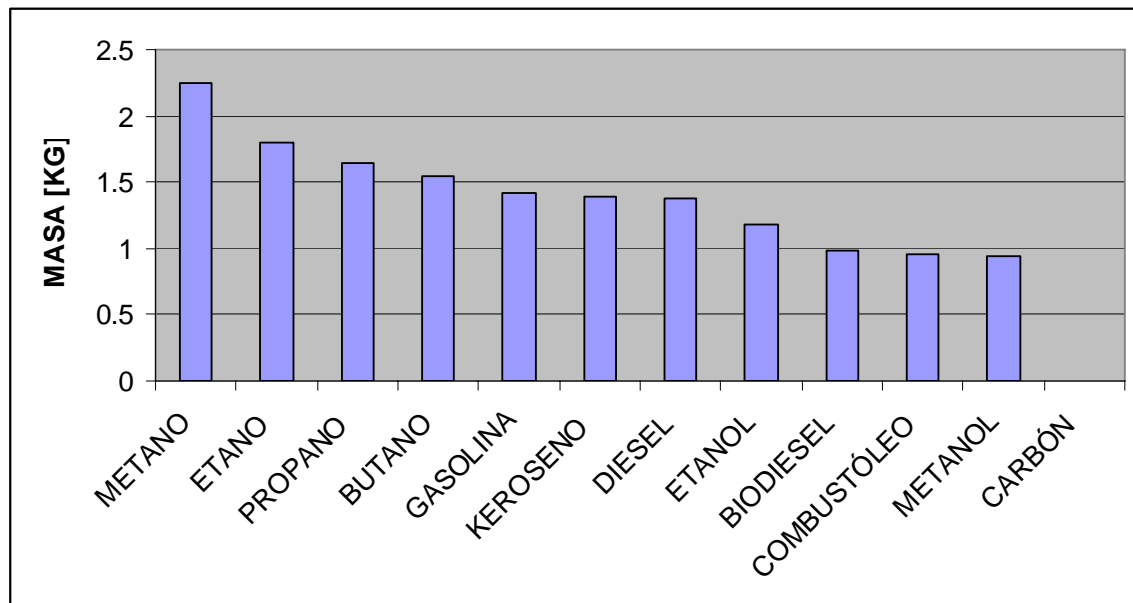
El combustible con el mayor nivel de agua emitida a la atmósfera es el **metano**, ya que tiene más del doble de emisiones de H<sub>2</sub>O (máscas), en función a la masa unitaria oxidada de combustible. [Gráfica 3.2]

El **etano**, **propano** y el **butano** son combustibles que producen una considerable cantidad de agua como emisiones, con valores de producción de masa de agua, 1.5 veces por arriba de la masa unitaria oxidada de cada uno de éstos. [Gráficas 3.4-3.5]

La **gasolina**, el **keroseno** y el **diesel** son de bajas emisiones de agua, produciendo masas de agua de aproximadamente menos de 1.5 veces la masa unitaria oxidada del combustible, en proporción. [Gráficas 3.8-3.10]

**Combustibles limpios.** A este grupo pertenecen los **alcoholes**, el **biodiesel** y el **combustóleo**, ya que son los que generan las mínimas cantidades de agua como

emisiones a la atmósfera con un promedio de 1 a 1 en proporción másica de generación de agua, con respecto a la masa oxidada del combustible. [Gráficas 3.6-3.7,3.11-3.12]



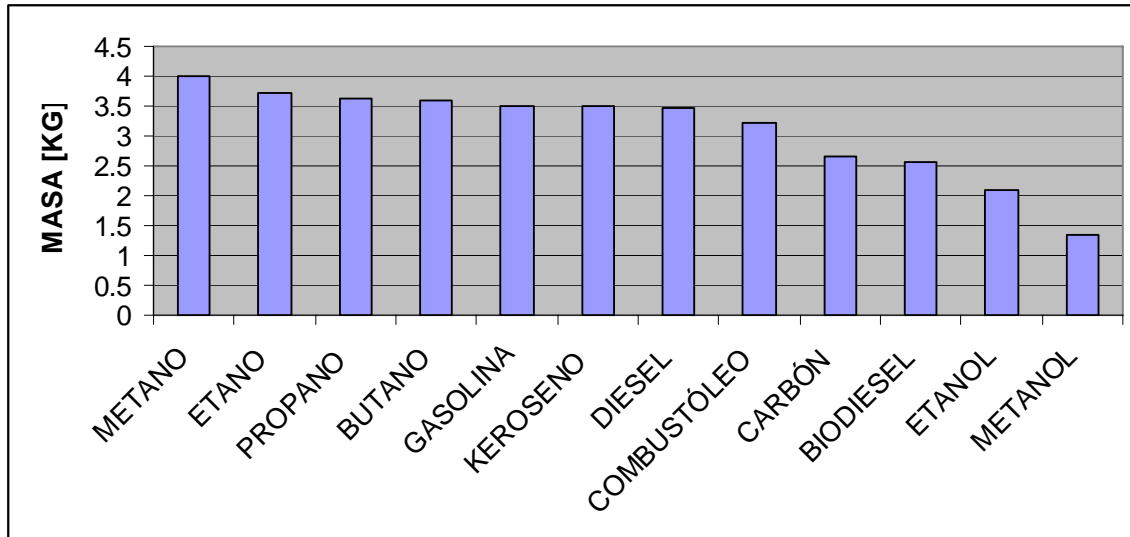
**Fig. 4.2 Masa del H<sub>2</sub>O obtenida con la oxidación de 1 [kg] de cada uno de los combustibles analizados.**

**Cantidad de oxígeno atmosférico necesario para la oxidación de cada uno de los combustibles analizados.** Dentro de este análisis se tienen los siguientes resultados:

Los combustibles que mayor cantidad de oxígeno requieren para su oxidación son el **metano**, el **etano**, el **propano** y el **butano**, con un aproximado entre 3.5 y 4 veces de oxígeno requerido contra la oxidación unitaria de masa de los mismos.

En general, la necesidad de oxígeno para oxidación, fluctúa en los valores anteriores, **de acuerdo a la gráfica 4.3** del oxígeno de oxidación, sin embargo, el **carbón** y el **biodiesel** se caracterizan por tener necesidades de oxígeno de poco más del 2.5 de la oxidación unitaria de masa de cada uno de ellos.

Por otro lado, los combustibles con las necesidades mínimas de oxígeno para su oxidación, son los alcoholes, el **etanol** y el **metanol**, combustibles oxigenados, siendo este último el que tiene una relación de menos del 1.5 con respecto a la oxidación unitaria del mismo.



**Fig. 4.3 Masa del O<sub>2</sub> requerida para oxidar 1 [kg] de cada uno de los combustibles analizados.**

### **Segunda parte: Oxígeno contenido en el Agua producida como emisiones a la atmósfera**

En esta parte se analizaron las cantidades y proporciones de las emisiones de agua para cada uno de los combustibles mediante el uso de estequiometría.

La cantidad de agua como emisión es mucho mayor para el caso particular del metano, como se explicó anteriormente, siendo los alcoholes los combustibles más limpios en este aspecto.

Ahora, realizando el análisis y relacionando las emisiones de agua, junto con el oxígeno retenido por la misma, se tiene que la proporción para el caso del **metano**, es la más alta de todos los combustibles analizados, lo que se traduce en el combustible más contaminante en este aspecto.

Es importante resaltar este aspecto en particular, ya que la cantidad de agua emitida por cada combustible, es muy similar a la cantidad (en masa) del oxígeno que necesita la molécula del agua para existir propiamente como tal.

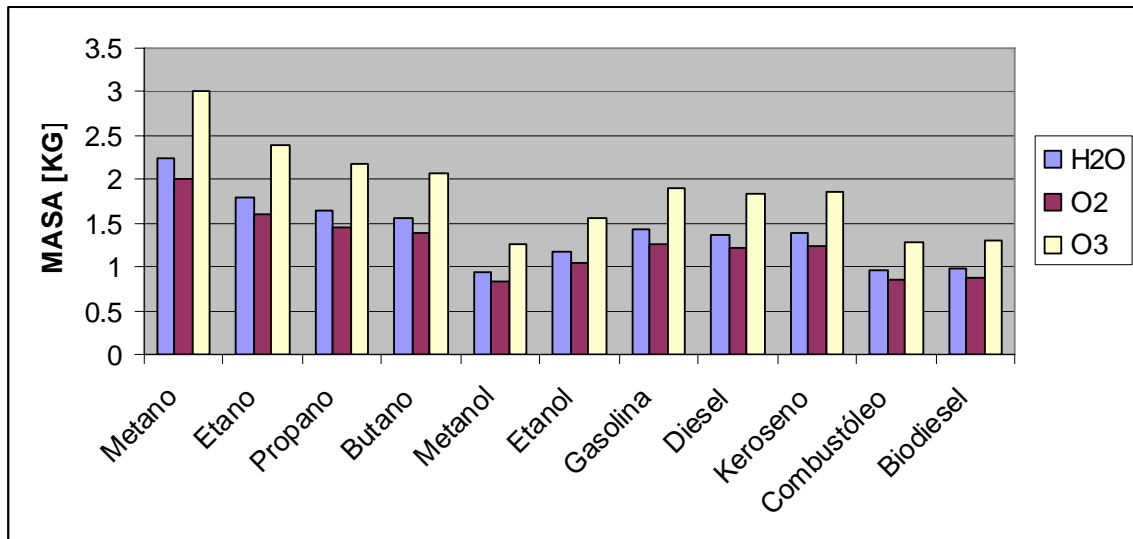
La proporción para este caso varía aproximadamente medio kilogramo en la relación agua – oxígeno secuestrado (por el agua), lo que se traduce en una relación directa entre ambos parámetros.

Los combustibles que se encuentran en la clasificación de altos contaminantes por agua como emisiones, son el **metano**, el **etano**, el **propano** y el **butano**, con un aproximado del 150 – 200% de emisión con respecto a la masa unitaria oxidada. Dentro de la clasificación de contaminantes medios, se encuentran la **gasolina**, el **diesel** y el

**keroseno**, con un aproximado del 150% de emisiones con respecto a la masa unitaria oxidada de cada uno de ellos.

Por último, dentro de las recomendaciones de este análisis, se encuentran los combustibles más limpios en emisiones de agua y por lo tanto, la mejor opción para evitar el exceso en el uso del oxígeno por estas emisiones. Estos son los **alcoholes** y el **biodiesel**.

Es importante realizar un estudio acerca de este tema, ya que desafortunadamente, ni los **alcoholes**, ni el **biodiesel**, son de los combustibles más utilizados en el planeta.



**Fig. 4.4 Cantidad de Oxígeno secuestrado por el H<sub>2</sub>O emitida, debido a la oxidación de los Combustibles Analizados. Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de éstos.**

### **Tercera parte: Déficit de Ozono debido al secuestro del oxígeno del agua para cada uno de los combustibles**

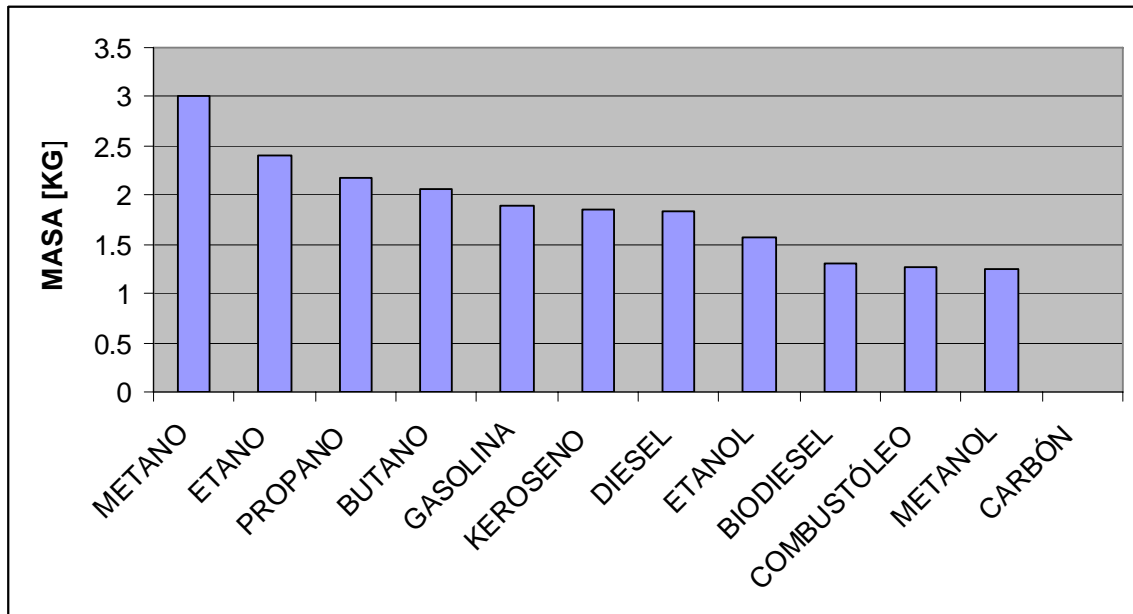
La mayor cantidad de ozono no generado debido a la oxidación de los combustibles es debido al uso del **metano**, esto en proporción con la oxidación de masa unitaria, ya que se encuentra en valores elevados de un 300% de ozono no creado, en proporción a la masa unitaria oxidada para este combustible.

El **etano**, **propano** y **butano**, son los combustibles que evitan que mayores cantidades de ozono nunca lleguen a la atmósfera, con proporciones de aproximadamente 2-2.5 veces el ozono no generado, debido a las oxidaciones de masas unitarias de dichos combustibles.

La **gasolina**, **keroseno**, **diesel** y **etanol**, son combustibles que limitan la creación de ozono en la atmósfera de manera no tan grave como los anteriores, ya que oscilan entre

1.5 y 2 veces en proporción de ozono no generado, con respecto a su oxidación de masa unitaria.

Por otra parte, los combustibles limpios resultantes de este análisis son el **biodiesel**, **combustóleo** y el **metanol**, como el combustible que menos limita la creación de ozono en la atmósfera, resaltando el hecho de que **el etanol** ya no se encuentra dentro de la categoría de mejores combustibles, como en análisis anteriores.



**Fig. 4.5 Cantidad de Ozono no creada debido a la oxidación de los Combustibles Analizados, (el carbón aparece con valor cero debido a que es un combustible que no genera emisiones de agua).**

#### **Cuarta parte: Análisis de emisiones y secuestro de ozono en referencia a la producción mundial de los combustibles analizados**

Se analizaron los principales combustibles con respecto a su uso en la industria global y en referencia a la producción de los mismos con respecto a los barriles de petróleo diarios producidos.

Para el caso de la **Gasolina**, se tiene una producción de 32.82 [milionton/día] producidas a nivel mundial, las cuales generan menos de 50 [milionton/día] de emisiones de agua a la atmósfera, lo que se traduce en un 150% de producción de emisiones con respecto a la masa oxidada de la gasolina.

De esta cifra se tiene que poco más de 40 [milionton/día] pertenece al oxígeno que necesita el agua para existir como una molécula y de esa cantidad de oxígeno, la cantidad de ozono no creado en la atmósfera se traduce en una cifra de más de 60 [milionton/día] tan solo debido a la gasolina quemada mundialmente.

La **Turbosina** y el **Diesel** han sido considerados juntos en producción por los datos de la **Secretaría de Energía [31]**, por lo que sus valores juntos son equiparables a los de la gasolina.

La producción de agua como emisión a la atmósfera es sensiblemente más elevada que para el caso de la gasolina, con un valor de más de 50 [mton/día], las cuales necesitan una mayor cantidad de oxígeno para formar la molécula (en relación a la gasolina). En cuanto al secuestro del ozono por parte de estos combustibles, se tiene un valor de más de 70 [mton/día].

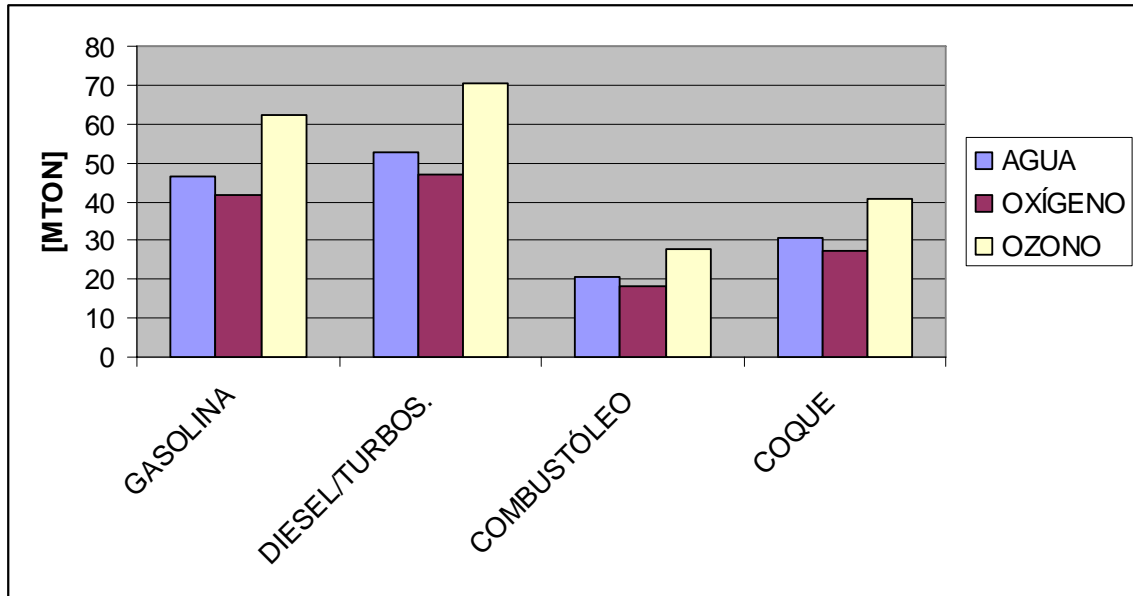
Para el caso del combustóleo se tiene una producción realmente muy baja en comparación a los 3 combustibles anteriores. La producción de agua como emisiones a la atmósfera apenas rebasa las 20 [mton/día], con cantidades de oxígeno que oscilan también poco antes de este valor.

El secuestro del ozono se presenta en cantidades también muy bajas en proporción a los combustibles anteriores, con poco menos de 30 [mton/día], valor que significa menos de la mitad de ozono secuestrado por este combustible en la misma cantidad de tiempo que los anteriores.

Por último se analizó el coque, mezclado con otros combustibles menores, sin embargo, el coque no produce agua como emisiones, ya que se encuentra formado principalmente de carbón y otros compuestos menores.

Se tiene entonces un total de 201.09 [mton/día] de ozono secuestradas por la oxidación de combustibles fósiles analizados anteriormente, cantidad de ozono no creada debido a la utilización diaria de estos combustibles.





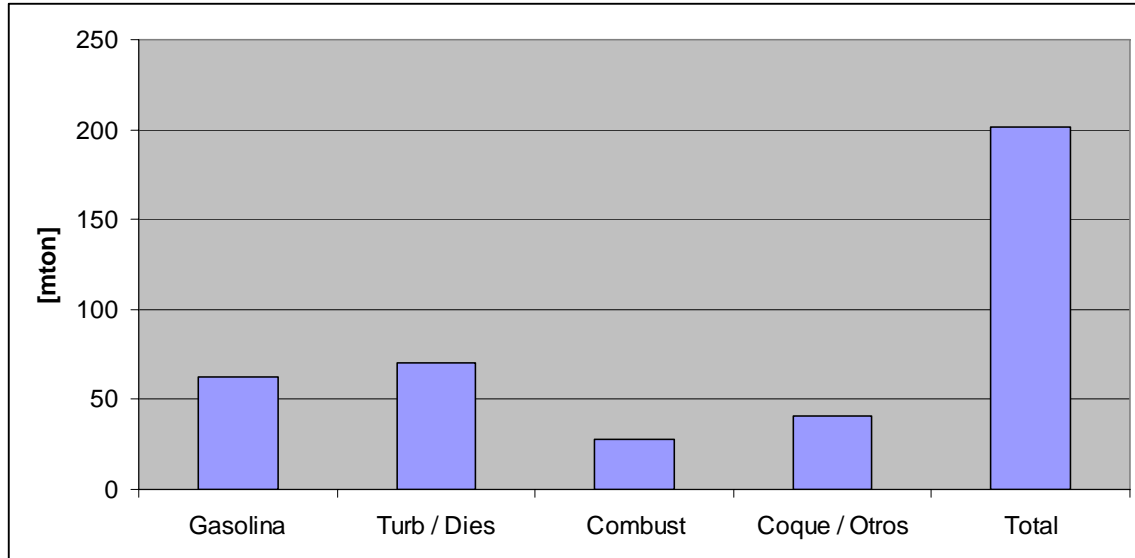
**Fig. 4.6 Miles de toneladas de agua emitida en la última década por los combustibles analizados. Se presenta también la cantidad de oxígeno retenido por el agua en el mismo periodo de tiempo y la cantidad de ozono no generado en la atmósfera, debido a la oxidación de los combustibles, también en la última década.**

El análisis final de acuerdo a los cálculos realizados, arroja que la gasolina es responsable de más de la cuarta parte del ozono que ha sido secuestrado por los combustibles en la última década, lo cual significa que no solo es el combustible fósil de mayor demanda en el mundo actual, sino también el causante de gran parte de los problemas relacionados con el calentamiento global y el efecto invernadero.

La turbosina y el diesel son también grandes contribuyentes a este tema, ya que juntos establecen un parámetro de casi el 35% del secuestro global de ozono atmosférico en la última década, que junto con la gasolina, establecen prácticamente un 60% del total de ozono no creado en el mundo.

El combustóleo, entre otros, establecen el 40% restante, siendo entonces estos combustibles de menor demanda por el hombre para sus actividades industriales y de transporte, aunque no menos contaminantes, ya que el combustóleo establece un aproximado 15% del total, dejando la última cuarta parte para el resto de los combustibles fósiles.

Estos datos fueron concluidos utilizando como parámetro los principales combustibles oxidados en el mundo en la última década.



**Fig. 4.7 Ozono no creado diariamente en la atmósfera en la última década, debido a la oxidación de los principales combustibles utilizados a nivel global.**

La figura ilustra, en resumen, las cantidades de toneladas de ozono no generado debido a la oxidación de los principales combustibles a nivel mundial, la **gasolina**, el **diesel**, la **turbosina**, el **combustóleo** y el **coque**, entre otros de mucho menos impacto en cuanto a generación mundial de barriles diarios.

Cabe mencionar que este análisis fue hecho de manera puntual, solamente para el caso de la emisión de agua debido a la oxidación de los diferentes combustibles fósiles, dejando a un lado en el análisis a las emisiones de dióxido de carbono. Por supuesto que éstas también son un factor importante dentro de la cantidad de oxígeno y consecuentemente, ozono no creado.

La complejidad del análisis y cuantificación del  $\text{CO}_2$  en el proceso de la fotosíntesis, hacen que su adición a este trabajo sea complicada de manera numérica, sin embargo, cabe mencionar que de tomarse en cuenta los valores de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en el presente, los valores en miles de toneladas que se concluyeron, serían aun más elevados, mencionando así la importancia de ambos tipos de emisiones dentro del proceso enfocado a investigar un estimado mundial del secuestro del ozono.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como principal objetivo verificar la influencia directa del uso de combustibles fósiles en el ambiente a nivel mundial, puntualmente su influencia directa en la capa de ozono.

El uso de este tipo de combustibles ha proliferado mundialmente en el último siglo debido a los constantes y exponenciales avances de la tecnología para el beneficio de la actividad económica del hombre.

Los cálculos y resultados del presente trabajo arrojan una influencia negativa que ha aumentado año con año, principalmente en la última década del siglo XX y en la presente. De la misma manera se tiene una relación directa entre el uso de los combustibles fósiles y el aumento de la temperatura media de la Tierra en las últimas décadas, fenómeno directamente relacionado al Efecto Invernadero y al Calentamiento Global.

Cualquier combustible fósil tiene impacto en las cantidades de dióxido de carbono que se encuentran en la atmósfera terrestre, pero aquí existen 2 principales factores que intervienen en este punto, el **poder calorífico** de los combustibles y la **necesidad** que se tiene de cada uno de estos combustibles. A este respecto, se conocen los de mayor demanda en el mundo, sin embargo, se ha demostrado que aún los combustibles con poco impacto de dióxido de carbono emitido, contribuyen de manera importante en estos fenómenos mencionados.

En relación a las emisiones de agua, el resultado individual fue cuantificado para determinar la relación directa del total de combustibles con el secuestro y la no generación de ozono atmosférico. Los principales puntos analizados en el presente trabajo fueron las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones de agua a la atmósfera para cada combustible. El CO<sub>2</sub> está presente en el fenómeno de la fotosíntesis, lo que hace difícil cuantificar los datos que realmente afectan al fenómeno de los agujeros de ozono en la Tierra.

El procedimiento mediante el cual se realizó el análisis fue en primer lugar cuantificar las cantidades máxicas de emisiones por masa unitaria de combustible, esto para los casos particulares de **dióxido de carbono, agua y oxígeno**. El objetivo de este análisis fue el de tener un parámetro de comparación entre los valores de emisiones máxicas para el CO<sub>2</sub> y el agua y de esta manera poder relacionar su impacto en el análisis final.

Las emisiones máxicas de dióxido de carbono fueron contempladas de manera cuantitativa, sin embargo fue complicado establecer su impacto en el análisis global, ya que como se ha mencionado anteriormente, su nivel de implicación en éste es complejo debido a su relación con el proceso fotosintético en el que se encuentran dichas emisiones.

Por otro lado, con el valor en masa de las emisiones de agua para cada combustible analizado, se tiene que una parte de las mismas corresponde al oxígeno, lo cual se ve claramente en la fórmula de la molécula del agua, por lo que fue necesario un análisis estequiométrico para poder estimar la masa de oxígeno que existe en cada una de las emisiones de agua para cada uno de los combustibles analizados (por masa unitaria).

Existen dos valores cuantificados de emisiones de oxígeno para cada uno de los distintos combustibles, la diferencia radica en que el primer valor se obtuvo para tener una referencia estadística de este tipo de emisiones, ya que es un número que hace referencia a **emisiones de oxígeno totales** por cada unidad de masa de combustible. El segundo valor se obtiene directamente del dato de **emisiones de agua** solamente, ya que de esta manera se hace referencia al oxígeno contenido exclusivamente en el agua de cada combustible.

Los valores calculados son en referencia a la última década, ya que es cuando han tenido mayor demanda los combustibles fósiles, por lo que es precisamente durante este periodo de tiempo cuando más se puede obtener un parámetro que indique el impacto de la oxidación de los combustibles en el medio ambiente.

El valor final de todo este estudio fue de 200 mil toneladas de ozono no generado en la última década debido a la oxidación mundial de combustibles, principalmente a la gasolina, el diesel, la turbosina y el combustóleo, que son los de mayor demanda en el mercado mundial de combustibles. El análisis fue desglosado para cada combustible, para determinar de esta manera el impacto individual de cada uno de ellos.

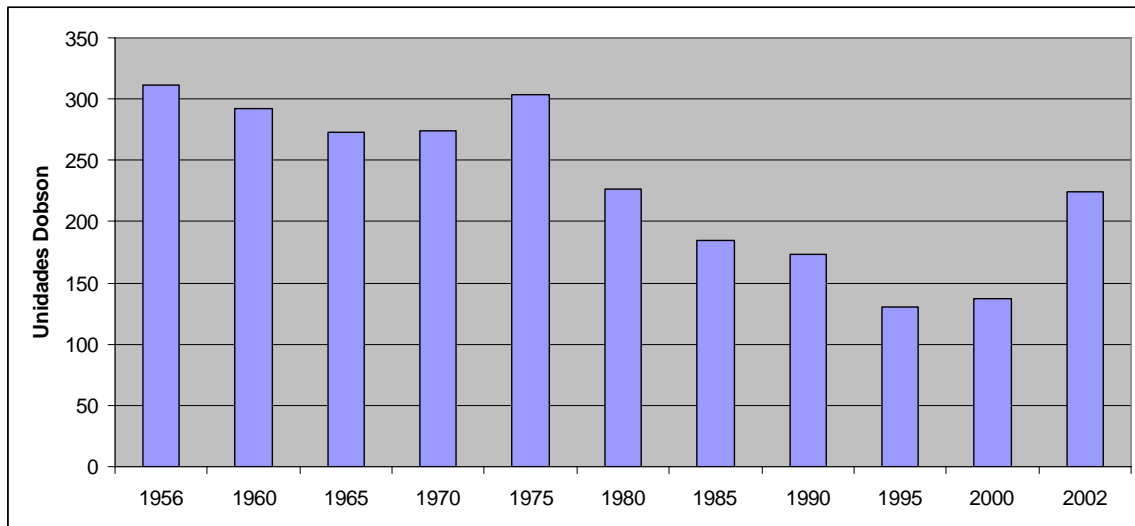
Este análisis entonces, fue complemento del análisis por masas unitarias para cada combustible, ya que solo teniendo ambas partes se puede comprender el real alcance del impacto ambiental que generan las necesidades económicas e industriales del hombre, impacto reflejado de manera puntual en el desarrollo de su tecnología y de su creciente necesidad de aumentar las demandas de energía que satisfagan esta tecnología, mediante la oxidación de combustibles fósiles.

Se observó que los combustibles que causan el mayor daño a la atmósfera y que son más influyentes en la disminución de la capa de ozono, son principalmente el **metano**, el **etano**, el **propano**, el **butano**, la **gasolina**, el **keroseno** y el **diesel**, combustibles que son mayormente utilizados a nivel mundial en la industria y en el transporte. El uso continuo de los mismos, degenera la creación de ozono atmosférico, teniendo como resultado un aumento en el efecto invernadero y por lo tanto, en el calentamiento global.

Los combustibles fósiles más limpios son el **etanol**, el **metanol**, el **biodiesel**, el **combustóleo** y el **carbón**, mencionando a éste último como el único que no produce secuestro de ozono atmosférico, ya que se analizaron las emisiones de agua por cada combustible y el carbón no emite ésta. El uso de estos combustibles, en específico el **biodiesel** y los **alcoholes**, es de mayor importancia para disminuir el uso de combustibles que afectan de manera importante la capa de ozono, mediante todo el proceso señalado en el presente trabajo.

Uno de los puntos comprobados en el proceso de este análisis, fue que los combustibles aparentemente limpios, aquellos que son mayormente *emisores de agua*, son considerados como buenos para la atmósfera, ya que se tiene establecido que el agua no es un contaminante como tal, sin embargo, todo el presente análisis ha sido contemplando exclusivamente *emisiones de agua* para los principales combustibles utilizados en el mundo. Los resultados muestran que el agua sí es un contaminante y además es uno de los principales, ya que se pueden observar las toneladas de ozono secuestrado en la última década, tan solo por causas de emisiones de agua en la atmósfera, debido a la oxidación de combustibles en el mundo.

### Agujeros de Ozono



**Fig. 4.8** Decremento de la capa de ozono en el último medio siglo. Los datos fueron obtenidos por un medidor Dobson (espectrómetro) situado en la Antártica. [32]

Los agujeros de ozono han ido aumentando con el paso de las décadas, de acuerdo a la figura mostrada, lo anterior cuantificado mediante un espectrómetro que se encarga de medir la cantidad de ozono en la zona de la Antártica, en unidades Dobson. Puede observarse que los agujeros son cada vez mayores, lo cual está ligado al aumento en el uso de los combustibles, sobretodo en el final del siglo XX y principios del actual.

Esta relación entre la cantidad de ozono en la atmósfera y el aumento de oxidación de combustibles, es el resultado del incremento de la población mundial y de la necesidad de satisfacer a la misma. El ozono seguirá disminuyendo conforme se sigan ignorando las alternativas de combustibles ecológicos o incluso, el uso de la electricidad como el medio principal para el impulso de las máquinas y no solo como un complemento como en los actuales motores híbridos de gasolina o diesel.

## Poder Calorífico de los Combustibles

El poder calorífico de los combustibles es un parámetro importante a considerar dentro de este análisis de resultados, ya sea que se utilice el inferior o el superior. Los combustibles entregan cierta energía por unidad de masa oxidada, además de la energía contabilizada proveniente de la condensación del agua en la misma oxidación (PCS), es por esta razón que cada combustible es diferente del otro en cantidades de masa oxidadas del mismo para generar un mismo valor de poder calorífico al proceso.

Ejemplificando lo anterior se tienen PC's [34] para combustibles altamente contaminantes, como la **gasolina** y también se analiza para combustibles mucho más limpios, como los **alcoholes**:

- Gasolina PCI = 43,950 [KJ/KG]
- Keroseno PCI = 43,400 [KJ/KG]
- Etanol PCI = 26,790 [KJ/KG]
- Metanol PCI = 19,250 [KJ/KG]

De estos datos se obtiene que el poder calorífico de dos combustibles, de los más contaminantes en cuanto a emisiones de dióxido de carbono y de agua, es muy elevado en comparación a los dos combustibles menos contaminantes en el mismo rubro, analizados en el presente estudio.

Se concluye entonces que la razón principal por la que la **gasolina**, la **turbosina** y el **diesel** son los combustibles fósiles más contaminantes, es por su elevado Poder Calorífico, lo que se relaciona con el limitado uso de los **alcoholes**, debido a su escaso PC, por lo que sería necesario oxidar masas mucho más elevadas de estos para poder igualar la potencia entregada por máquinas de **gasolina** o **diesel**.

## Referencias Bibliográficas, texto e imágenes

1. Greenpeace Chile, [www.greenpeace.org/chile/campañas/cambioclimático](http://www.greenpeace.org/chile/campañas/cambioclimático)
2. Protocolo de Kyoto
3. United Nations Framework Convention on Climate Change, [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)
4. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, (EPA) [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
5. Robert A. Rohde, Universidad de Berkeley, Departamento de Física
6. “Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático”, Margarita Caballero, Instituto de Geofísica de la UNAM.
7. Universidad de Arizona, [www.arizona.edu/](http://www.arizona.edu/)
8. Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Colorado, publicado en Geophysical Research Letters por Marika Holland.
9. Comité Científico Internacional del Ártico, “Evaluación del Impacto Climático en el Ártico”, [www.scar-iasc-ipy2008.org/](http://www.scar-iasc-ipy2008.org/)
10. Fotografía del Sol, NASA
11. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC
12. Mario Molina, “Caras del Ozono”, Presentación en la UNAM, 1998 y “Los Clorofluorocarbonos y el Ozono Estratosférico, un Problema Global”, publicado en “Ciencia Hoy”, 1996.
13. Geociencias, UNAM [www.geociencias.unam.mx/.../Atmosfera.html](http://www.geociencias.unam.mx/.../Atmosfera.html)
14. Protocolo de Montreal
15. NASA, Earth Observatory [eol.jsc.nasa.gov/EarthObservatory/Smog\\_in\\_the...](http://eol.jsc.nasa.gov/EarthObservatory/Smog_in_the...)
16. Theodore Brown, *Química, la Ciencia Central*, Prentice Hall
17. Raymond Chang, *Química*, Mc. Graw Hill, 4ª Ed.
18. [www.xtec.es/.../galileo/jupiter/PIA00522.jpg](http://www.xtec.es/.../galileo/jupiter/PIA00522.jpg)
19. [www.nasa.gov/images/content/63575main\\_image\\_f](http://www.nasa.gov/images/content/63575main_image_f)
20. [www.diariocolatino.com](http://www.diariocolatino.com)
21. ONU
22. Centro de Información y Análisis de Dióxido de Carbono
23. La Conferencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Medio Ambiente
24. La Cumbre Mundial del Desarrollo Sustentable
25. James Arthur Campbell, Professor of Chemistry, Harvey Mudd College
26. Dual Fuel Organization, EAU
27. Energy Information Administration, U.S. Government
28. M. en I. Rogelio Escalera, UNAM, Dr. en Ingeniería de la Combustión, Universidad de Salford, Inglaterra
29. Wearcheck Ibérica, Análisis de Lubricantes y Combustibles
30. American Petroleum Institute
31. Perspectiva de Petrolíferos 06-15, Secretaría de Energía; Statistical Review of World Energy, junio 2006
32. EPA, US, British Antarctic Survey
33. Instituto Mexicano del Petróleo, [www.imp.com](http://www.imp.com)
- 34.