

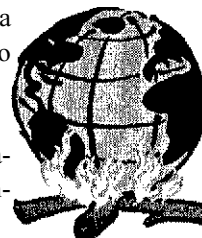
## ILUSTRANDO EL RECALENTAMIENTO GLOBAL TERRESTRE: Introducción básica al “EFECTO INVERNADERO” por contaminación antropogénica del aire

Marcos A. PEÑALOZA M.\*

### *Resumen*

El calentamiento global terrestre, por una alteración antropogénica de la composición natural del aire, es explicado en términos simples. Este fenómeno, también conocido como “efecto invernadero”, es cuantificado en función de la emisividad de la atmósfera a través de la variación de tres parámetros: la temperatura efectiva, atmosférica y superficial del planeta. En una primera estimación, que usa un modelo atmosférico de una sola capa homogénea plano paralela, esta variación es, en valor absoluto, muy pequeña y es a la que, acostumbradamente, se hace referencia. A primera vista quizá dicha variación parece insignificante. Sin embargo interpretada como un promedio anual global, es indicativa de apreciables cambios climáticos significando fuertes variaciones en las temperaturas registradas regularmente a lo largo del año. Es importante, en consecuencia, comprender y aclarar este significado cuya explicación aquí se hace con una analogía muy sencilla. En una segunda aproximación mas realista, el “efecto invernadero” es explicado en una atmósfera de varias capas homogéneas plano-paralelas, como función de la variación de la opacidad o espesor óptico de la atmósfera. Se presenta un ejemplo fácil de seguir que ilustra el efecto que tendría el fenómeno sobre la criosfera (deshielo polar) e hidrosfera (aumento del nivel del mar). Tratados internacionales están siendo aplicados para prevenir y mitigar este efecto.

**Palabras Clave:** Atmósfera, efecto invernadero, calentamiento global, contaminación del aire, balance radiactivo, cambio climático.



\* Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias. Equipo Interdisciplinario e Interdepartamental de Investigación Atmosférica. Mérida, Edo. Mérida. Venezuela. (Mpenaloz@ula.ve)

## ABSTRACT

The physical causes that lead to the global warming due to an anthropogenic alteration of the natural composition of air are explained in simple terms. This phenomenon, also known as “Greenhouse Effect”, is quantified taking into account the variation of three parameters as a function of atmospheric emissivity. They are, respectively, the effective, atmospheric, and superficial temperature of the planet. Under a first approximation which uses an homogeneous one layer atmospheric model, this variation in absolute value is very small: Thus, at first glance, such a variation perhaps seems to be insignificant. However, taking it as a global annual average, it is indicative of appreciable climate changes signifying strong variation in the regular temperature registered along the year. Therefore, it is important to understand and clarify this dependence whose explanation is made here with a very simple analogy. Using a more realistic second approach more, the “Greenhouse Effect” is explained as a function of the opacity or optical depth of the atmosphere by applying a multi-homogeneous layer model. To illustrate some important consequences of the phenomenon a very simple example, easy to follow, is presented which is related to the cryosphere (ice cap melting of South Pole) and the hydrosphere (sea level raising).

International treaties are being applying to reduce and minimize this effect.

**Words Key:** Atmosphere, effect hothouse, global heating, contamination of the air, balance radiativo, climatic change.



## **ILUSTRANDO EL RECALENTAMIENTO GLOBAL TERRESTRE: Introducción básica al “EFECTO INVERNADERO” por contaminación antropogénica del aire**

### **I. INTRODUCCIÓN**

Normalmente hablando, el aire natural, además de estar formado por una mezcla de diversos gases de diferentes concentraciones bien conocidas, contiene una parte constituida por partículas en suspensión (aerosoles) de diferentes tipos, naturaleza y proporciones. Por ello, el aire natural perfectamente limpio, en términos reales, no existe y por el contrario, como algo común, siempre está sucio o tiene algo de suciedad que puede ser de origen natural o antropogénico; dependiendo de las circunstancias, este sucio puede ser inofensivo, benigno y hasta positivo, o puede ser dañino y maligno. En el sentido positivo, existen procesos convenientes en la naturaleza (ciclos) que ocurren en diferentes partes de la geoesfera, que dependen en gran parte de la circulación e intercambio de partículas naturales y gases en la atmósfera. Así la calificación y cuantificación de la suciedad del aire por partículas y/o gases extraños o no, queda sujeta a su origen, papel, nivel, alcance, efectos y consecuencias que de ella se deriven. Se puede hablar, entonces, de la suciedad combinada natural (inofensiva o dañina) y de la suciedad artificial (generalmente dañina) del aire. Cuando

está suciedad, combinada o no, se presenta en el aire por encima de ciertos niveles o cantidades, o está compuesta por elementos extraños (gases o partículas) a su composición normal, podremos hablar de una contaminación general del aire en el sentido negativo de la expresión.

Específicamente, el aire está contaminado cuando la concentración de cualquiera de sus ingredientes secundarios (naturales y/o artificiales) es lo suficientemente elevada como para: (1) dañar la salud de las personas y otros seres vivos, (2) causar pérdida de bienestar, (3) disminuir la visibilidad y/o (4) producir cambios climáticos (OPS: 1980). La pérdida de bienestar puede ser por: (a) acumulación de polvo y suciedad, (b) emanación de olores desagradables y/o (c) disminución de los rayos solares.

La contaminación del aire como problema ambiental central abarca una serie de posibles escenarios, formas o manifestaciones que varían tanto en dimensión espacial como en dimensión temporal. Se reconoce, entonces, que este problema no es uno solo sino muchos interconectados,

con diferentes características que lo hace, a la hora de su estudio, conocimiento y solución, un problema muy complejo de naturaleza inter y/o multidisciplinaria.

Una visión general de las diferentes categorías y escalas espaciales y temporales de cómo este problema se presenta, muestra que la contaminación del aire puede ser un episodio o evento muy localizado y rápido, pero muy

agudo o grave, o llegar a ser un fenómeno progresivo que potencialmente puede estar afectando globalmente a todo el planeta.

Al respecto, la Tabla 1 muestra como la contaminación del aire puede ser categorizada tomando en cuenta cuatro aspectos generales: la escala horizontal, la escala vertical, la escala temporal y la escala de pertinencia o competencia jurisdiccional.



HORIZONTAL	VERTICAL	TEMPORAL	JURISDICCIÓN
Local	Altura de Chimeneas	Horas	Municipal-Vecinal
Urbana	-1 km	Días	Distrital
Regional	Troposfera	Meses	Estatal-Nacional
Continental	Estratosfera	Años	Internacional-Nacional
Global	Atmósfera	Décadas	Internacional

Ambitos bajo los cuales la contaminación del aire puede ser considerada (adaptado de Stern et al.: 1984).

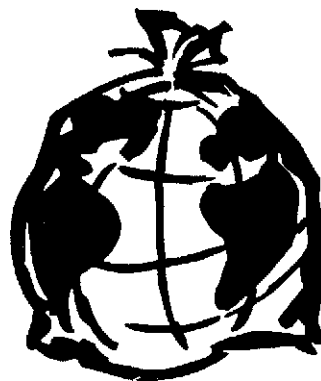
La primera escala (horizontal) indica cuánta superficie de la Tierra está envuelta en el problema. La segunda (vertical) indica qué profundidad (o altura) de la atmósfera está involucrada en el problema. La tercera (temporal) señala cuál puede ser la duración del problema y el tiempo disponible para que se resuelva. La cuarta y última, determina cuál sería el nivel de los organismos e instituciones jurisdiccionales a los que

le compete atacar y resolver el problema oficialmente.

La focalización del problema de acuerdo a este esquema define, entre una gran variedad de cosas, su evaluación teórica y/o práctica, pronósticos o predicciones, recursos, costos, impacto o consecuencias, estrategias (de mitigación o adaptación), legislación, etc., que evidencia una gran complejidad.

Hoy día los ejemplos de contaminación ambiental (de origen antropogénico), a diferentes escalas y dimensiones, y en particular los que tienen que ver con el aire y que lo someten a traumas adicionales, además de los naturales, abundan por doquier debido al alto grado de desarrollo tecnológico que ha alcanzado la civilización moderna contemporánea. Por mencionar algunos, que destacan por su relevancia y trascendencia, se pueden mencionar el accidente de la planta nuclear de Chernobyl, Ucrania, (contaminación radioactiva letal), lluvia ácida, episodios de altísimo grado de contaminación (smog fotoquímico) en grandes ciudades sobrepobladas, accidente industrial de Bhopal, India, (contaminación química venenosa), destrucción de la capa estratosférica de ozono o de la ozonósfera (penetración de radiación solar ultravioleta en exceso), el recalentamiento global (aumento de la temperatura media global).

De los anteriores, el problema conocido ampliamente como “Efecto Invernadero” o “Recalentamiento Global” (en inglés “Greenhouse Effect”) será, en esta oportunidad, ilustrado a un nivel básico para introducir conocimientos conceptuales que lleven al entendimiento esencial del mismo. Este problema, conforme a la Tabla 1, abarca a todo el planeta y a toda la atmósfera, es a largo plazo y de pertinencia internacional, es decir, nos concierne a todos. La historia de cómo este pro-



blema llegó a ser identificado y cuantificado, en sus primeras aproximaciones, puede ser encontrada en Jones & Henderson-Sellers (1990) Y RSAS (1997). Una discusión sobre el tratamiento y cobertura dado al fenómeno por los medios de comunicación social impresos anglosajones entre 1987 y 1990, es presentada por Wilkins (1993) y el tema y sus consecuencias es tratado a un buen nivel general por Aubrecht (1988), Sagan (1990), Mitchell (1990), Erickson (1992) y Alonso & Ramis (1996). Un trabajo más completo que abarca aspectos adicionales sobre el cambio climático es el de Vázquez-Abeledo (1998).

Para este fin, es necesario entender primero el efecto de invernadero natural terrestre que hace a este planeta habitable y confortable para la vida, en comparación con los otros planetas terrestres, en particular, con Marte y Venus. Esto se hará con una matemática y una física muy simples.

## II. EL EFECTO DE INVERNADERO NATURAL TERRESTRE

Es obvio que la Tierra como cuerpo en el espacio, en promedio, tiene que estar en equilibrio de radiación (equilibrio radiactivo); de lo contrario, su temperatura iría en aumento hasta que explotara o se evaporara, Q su temperatura iría disminuyendo hasta que se congelara.

En tal equilibrio se cumple que:

$$\Delta F = F_{\downarrow} - F_{\uparrow} = 0, \quad (1)$$

donde  $F_{\downarrow}$  es el flujo de energía solar que recibe la tierra y que entra por su atmósfera y  $F_{\uparrow}$  es el flujo de energía térmica terrestre que sale irradiado hacia el espacio exterior.

La tierra, a una distancia promedio del Sol, recibe del él la cantidad de energía  $S_0 = 1368 \text{ joules}/(\text{s m}^2) = 1368 \text{ W/m}^2$ , la cual es intersectada por la cara de la Tierra que está dando en ese momento al Sol; esa cara (disco) tiene un área de  $\pi R_T^2$ , donde  $R_T$  es el radio de la Tierra. Ahora bien, la Tierra refleja parte (fracción del total) de esa energía y la devuelve al espacio. Esto se conoce como albedo,  $a$ , el cual depende de las propiedades del sistema, atmósfera-superficie. Entonces la parte de  $S_0$  que entra a la tierra es  $(1-a)$ , y el total que entra a través de toda la cara es,

$$F_{\downarrow} = S_0(1-a)\pi R_T^2. \quad (2)$$

Al mismo tiempo, la Tierra, emite al espacio exterior (como un cuerpo esférico calentado a una temperatura radiación,  $T_e$ ), una radiación térmica, por segundo y por metro cuadrado, dada por la ley de Stefan-Boltzmann (ver mas abajo):  $\sigma T_e^4$  donde  $\sigma$  es una constante igual a  $5,6705 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ . esta radiación es emitida a través de la superficie de todo el globo terráqueo que es igual a  $4\pi R_T^2$ . por lo tanto, la cantidad de energía irradiada al espacio por toda la Tierra es:

$$F_{\uparrow} = 4\pi R_T^2 \sigma T_e^4. \quad (3)$$

Por condición de la ec.(1):

$$S_0(1-a)\pi R_T^2 = 4\pi R_T^2 \sigma T_e^4, \quad (4)$$

la cual se reduce a,

$$S_0(1-a) = 4\sigma T_e^4. \quad (5)$$

Despejando  $T_e$  de la ec.(4),

$$T_e = [(1/4\sigma)S_0(1-a)]^{1/4}. \quad (6)$$

con  $a = 0,35$  y demás valores dados arriba,

$$T_e = 255 \text{ K } (-18 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Este valor de  $T_e$  representa la temperatura promedio correspondiente a la energía térmica emitida tanto por la superficie de la Tierra como por su atmósfera. vista desde el espacio. Esta radiación se detecta como si viniera desde una altura alrededor de los 5 km sobre el nivel del mar. Así el nivel de radiación efectiva del sistema combinado no se localiza en la superficie sino

aproximadamente en la mitad (por masa) de la atmósfera.

La pregunta que sigue es: ¿cuál es entonces la temperatura de radiación,  $T''$  de la superficie terrestre y cuál es la temperatura de radiación,  $T'$  de la atmósfera?

La atmósfera, por encima del 99%, está compuesta de moléculas diatómicas y triatómicas las cuales, absorben radiación (que afecta sus modos de vibración y rotación) en un amplio rango del espectro electromagnético en particular, ellas son más efectivas absorbiendo en el rango infrarrojo, IR, ( $\lambda = 1-100 \mu\text{m}$ ) que en el visible y en el cercano IR ( $\lambda = 0,3-1 \mu\text{m}$ ). Como resultado, el grueso de la radiación solar (la cual está concentrada alrededor de este último intervalo), pasa a través de la atmósfera y es absorbida por la superficie, la cual se calienta hasta alcanzar, en promedio, una temperatura de equilibrio  $T_s$ .

En el equilibrio, la superficie irradia hacia arriba, hacia la atmósfera, energía IR la cual es parcialmente absorbida por estas moléculas de la atmósfera como el  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  etc. (gases invernadero).<sup>2</sup> En equilibrio radiativo, esta energía parcialmente absorbida es re-emitida hacia arriba y hacia abajo (hacia la superficie). Esta absorción es selectiva en lo que se refiere a  $\lambda$ . (longitud de onda de la radiación). pero por el momento suponga-

mos que la misma no lo es, por lo que ahora se considera que la atmósfera absorbe como un cuerpo "gris" que tiene una emisividad  $E_a < 1$ , e independiente de  $\lambda$ . (en el IR). La emisividad es la fracción de energía emitida (por unidad de tiempo y por unidad de superficie) por el cuerpo con relación a la que emitiría si irradiara en todas las longitudes de onda (cuerpo negro). Si  $E_a = 1$ , entonces el cuerpo emite como "cuerpo negro" (en todas las longitudes de onda). La distribución de esta energía en función de  $\lambda$ , genera una curva la cual es descrita matemáticamente por una función que al integrarse (área bajo la curva), da la energía total emitida en todas las longitudes de onda (por unidad de tiempo y de superficie). Esta última, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura de radiación, llamada temperatura efectiva  $T_e$  (ley de Stefan-Boltzmann:  $\sigma T_e^4$ ).

Con estas aproximaciones y consideraciones, se puede construir un modelo del sistema atmósfera-superficie de una sola capa, como se muestra en la siguiente Figura I (Ackerman: 1991).

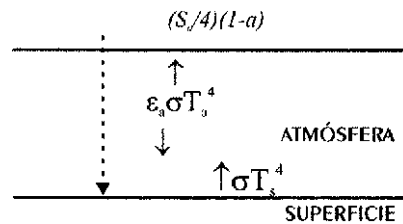


FIGURA I

La atmósfera es representada por una sola capa con una temperatura uniforme  $T_a$ . En el equilibrio, el balance de energía en este modelo simple puede ser representado por un sistema sencillo de dos ecuaciones con dos incógnitas:  $T_s$  y  $T_a$ .

En la superficie:

$$(S_0/4)(1-a) + \epsilon_a \sigma T_a^4 = \sigma T_s^4 \quad (7)$$

En la atmósfera:

$$\epsilon_a \sigma T_s^4 + \epsilon_a \sigma T_a^4 = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (8)$$

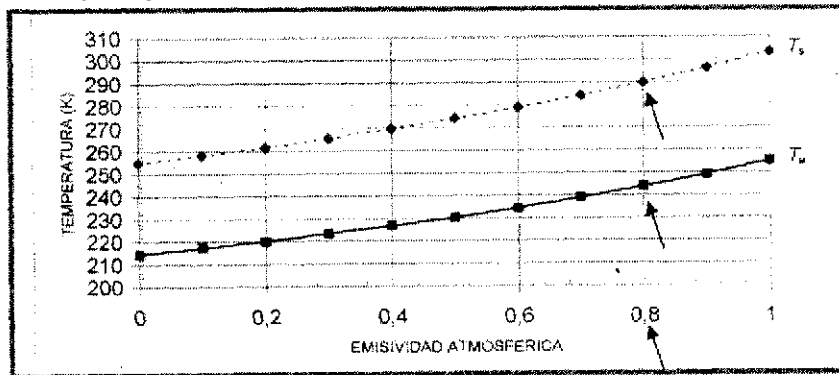
Resolviendo el sistema,

$$T_s = [1/(2)]^{1/4} T_a \quad (9)$$

$$T_s = [(1/4)S_0(1-a)/\sigma(1-1/2\epsilon_a)]^{1/4} = T_c/[1-(1/2)\epsilon_a]^{1/4} \quad (10)$$

$$T_a = T_c/[2(1-1/2\epsilon_a)]^{1/4} = T_c/[2-\epsilon_a]^{1/4} \quad (11)$$

Las ecs. (10) y (11) dan, respectivamente,  $T_s$  y  $T_a$  en función de  $T_c$  y de  $\epsilon_a$ , con  $0 \leq \epsilon_a \leq 1$ . La Figura 2 muestra gráficamente la variación de  $T_s$  y  $T_a$  en función a (con  $T_c = 255$  K).



**FIGURA 2.** Temperaturas atmosférica y superficial en función de la emisividad atmosférica (modelo de una sola capa)

Note que  $T_s \geq T_c$  y que  $T_a \leq T_c$ .

La flecha inferior en la Fig.2 (Ackerman: 1991) indica el valor de 0,8 que es la emisividad de la atmósfera espectralmente promediada. Los correspondientes valores de  $T_s$  y  $T_a$  son, respectivamente, 288 K (flecha superior) y 244 K (flecha intermedia).

También de la Fig. 2 se observa que para  $\epsilon_a \rightarrow 0$ ,  $T_s \rightarrow T_c = 255$  K y  $T_a = 214$  K; para  $\epsilon_a \rightarrow 1$ ,  $T_s \rightarrow 303$  K y  $T_a \rightarrow T_c = 255$  K.

Para  $E_a = 0$  (no hay atmósfera), el valor exacto de  $T_a$  no tiene significado físico.

Actualmente la temperatura de la superficie terrestre está 33 K (= 288 K-255 K) por encima de la temperatura de equilibrio  $T_e$  y la temperatura de la atmósfera está 11 K por debajo (255 K-244 K). El calentamiento de la superficie se debe al flujo que devuelve la atmós-

fera hacia abajo. Esto último se conoce con el nombre de *calentamiento global o efecto de invernadero natural terrestre*.

Sin este efecto, la superficie de nuestro planeta sería significativamente más fría y el ambiente menos hospitalario y menos apropiado para la vida.

## II. ALTERACIÓN DEL EFECTO DE INVERNADERO (CALENTAMIENTO GLOBAL ADICIONAL)

Las concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O determinan fundamentalmente, junto otros gases-traza que absorben en el IR, la emisividad de la atmósfera terrestre. Si todas estas concentraciones o cualesquiera de ellas se altera, la temperatura de la superficie se alterará como también lo hará la temperatura atmosférica (ecuaciones. 10 y 11).

Para ver como se altera la temperatura de la superficie, reorganicemos la ecuación (10) como,

$$[1-(1/2)\epsilon_a]\sigma T_s^4 = (1/4)S_0(1-a). \quad (12)$$

Diferenciamos esta expresión con respecto a la temperatura superficial respecto de la emisividad:

$$[1-(1/2)\epsilon_a]4\sigma T_s^3 \Delta T_s + \sigma T_s^4 (-1/2)\epsilon_a \Delta \epsilon_a = 0. \quad (13)$$

Busquemos cuanto varía la temperatura superficial,  $\Delta T_s$ , en función de un cambio  $\Delta \epsilon_a$ , dividiendo por  $T_s^4$  ambos miembros y reorganicando,

$$[1-(1/2)\epsilon_a]4\sigma(\Delta T_s/T_s) - \sigma(1/2)\epsilon_a \Delta \epsilon_a = 0 \Rightarrow \Delta T_s = T_s \epsilon_a \Delta \epsilon_a / (8-4\epsilon_a). \quad (14)$$

La FIGURA 3 muestra gráficamente la ec.(14) para diferentes valores de  $\Delta \epsilon_a$ .

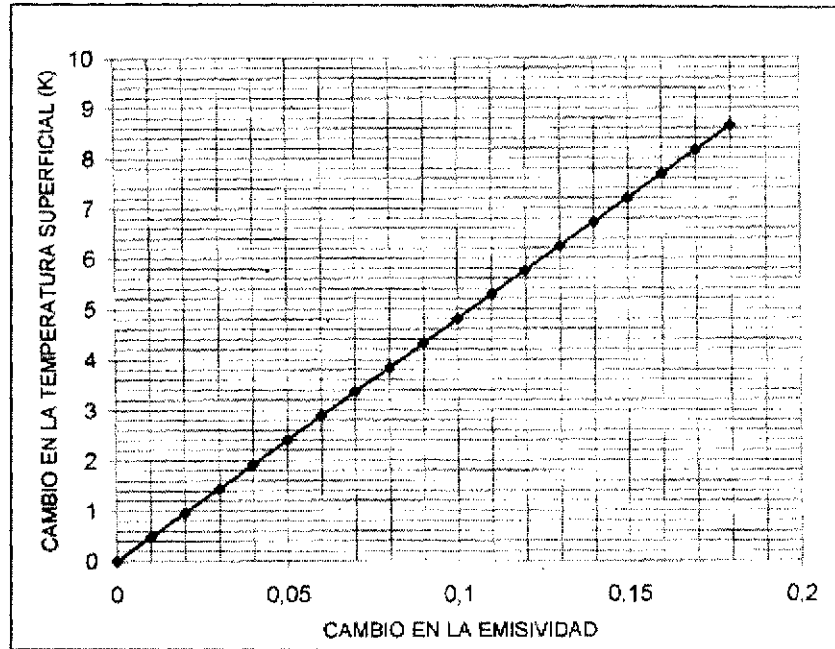


FIGURA 3. Cambio en la temperatura superficial terrestre en función del cambio de emisividad.

Se estima (Ramanathan y Coakley: 1979) que si se dobla en el futuro la concentración actual de CO<sub>2</sub> (-358 ppmv - 2x 358 ppmv), producto de la actividad antropogénica, habrá un flujo adicional atmosférico hacia debajo y a nivel de la superficie de 4 W/m<sup>2</sup>, equivalente a un aumento de la emisividad de 0,025. Del gráfico anterior, se ve que esto equivale a un cambio de la temperatura superficial terrestre de  $\Delta T = 1,2$  K. Encontrar cómo varía  $\Delta T$  vs  $\Delta E$  y comparar con la curva dada en la Fig. 3, es un ejercicio interesante que se deja al lector.

La predicción hecha por este modelo sobre-simplificado se ha basado, entre otras, en las siguientes aproximaciones:

- 1.- La atmósfera tiene una sola capa homogénea.
- 2.- Toda la energía solar llega a la superficie.
- 3.- La atmósfera emite como un cuerpo gris.
- 4.- La capa contiene solo CO<sub>2</sub>
- 5.- La atmósfera no contiene nubes.
- 6.- La radiación es el único mecanismo de transferencia de energía.
- 7.- La radiación solar cae per

pendicularmente.

8.- La superficie absorbe toda la energía que le llega.

En general, una variación de la temperatura  $T_s$  y de  $T_a$ , significa una variación también de  $T_e$ , la cual llamaremos  $\Delta T_e$ . Para estudiar, bajo un enfoque alternativo, esta variación debido a una alteración de la composición de la atmósfera por contaminación, consideremos que el globo terráqueo tiene una temperatura de radiación  $T_e$ , asociada con un flujo hacia el espacio exterior dado por la ley de Stefan-Boltzmann ( $S_e = \sigma T_e^4$ ), cuando el globo terráqueo adquiere una nueva temperatura de equilibrio  $T_e'$ , el flujo ha variado de  $S_e$  a  $S_e'$ , en una cantidad

$$\Delta S_e = S_e' - S_e$$

En símbolos,

Si

$$S_e \rightarrow S_e' \Rightarrow \Delta S_e = S_e' - S_e \Rightarrow S_e' = \Delta S_e + S_e \quad (15)$$

Como consecuencia,

$$T_e \rightarrow T_e' \Rightarrow \Delta T_e = T_e' - T_e \Rightarrow T_e' = \Delta T_e + T_e \quad (16)$$

De ahí que:

$$\Delta S_e \rightarrow \Delta T_e \quad (17)$$

¿Cómo se relacionan estos dos cambios? Siguiendo a Knox (1999),

aplicamos la Ley Stefan-Boltzmann a  $S_e'$ , y por aplicación de ec.(15) y (16).

$$S_e' = \sigma T_e'^4 \Rightarrow (S_e + \Delta S_e) = \sigma (T_e + \Delta T_e)^4 \quad (18)$$

Dividiendo ec.(14) por  $S_e$ ,

$$[1 + (\Delta S_e/S_e)] = (\sigma/S_e)(T_e + \Delta T_e)^4, \quad (19)$$

$$[1 + \epsilon'] = (1/T_e^4)(T_e + \Delta T_e)^4,$$

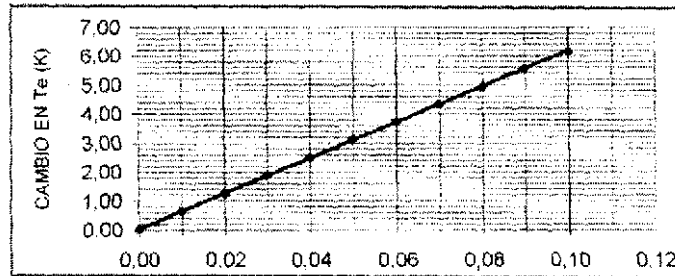
Donde  $\epsilon' = (\Delta S_e/S_e)$  representa la variación de  $S_e$  como fracción del flujo original  $S_e$ . Despejando  $\Delta T_e$  en ec.(19),

$$[1 + \epsilon']^{1/4} = (1/T_e)(T_e + \Delta T_e) \Rightarrow [1 + \epsilon']^{1/4} = (1 + \Delta T_e/T_e) \Rightarrow$$

$$\Delta T_e/T_e = (1 + \epsilon')^{1/4} - 1 \Rightarrow$$

$$\Delta T_e = [(1 + \epsilon')^{1/4} - 1] T_e \approx (1/4)\epsilon' T_e \quad (20)$$

La Figura 4 muestra gráficamente la ec.(20). Note que un aumento, por cualquier causa, del flujo IR de un 0,01 del flujo inicial (o sea, de un 1%), produce un aumento en la temperatura de equilibrio radiativo de la Tierra de aproximadamente 0,7 K, o casi de 1 K.



Cambio en la alteración (Fracción) del Flujo ir Saliente

**FIGURA 4.** Cambio de la temperatura efectiva terrestre debido a una variación de la alteración (fracción) del flujo IR saliente inicial

Una de las cuestiones que es conveniente aclarar a estas alturas, es la interpretación que hay que darle a estos cambios de temperatura del orden de I K. Se podría argumentar que un cambio de un grado Kelvin, es un cambio muy bajo como para que produzca cambios en el sistema climático. Vale decir que esta variación de temperatura es menor de la que ocurre normalmente entre el día y la noche sin que esto produzca trastornos climáticos. El punto es que cuando se habla de cambios en la temperatura de radiación (efectiva, atmosférica y superficial), se está hablando, respectivamente, de una temperatura relacionada con la radiación calorífica que emite las moléculas en virtud del intercambio de sus energías de vibración y rotación con su energía de traslación, que es la que tiene que ver con la temperatura cinética (la que mide un termómetro) (Goody & Walker: 1975). En el equilibrio, la temperatura efectiva de radiación debe corresponder al promedio anual global general de la temperatura cinética del sistema atmósfera-superficie. Así, una variación pequeña de estas temperaturas de radiación significaría variaciones mayores en las temperaturas (cinéticas) que normalmente se presentan diariamente y que se usan para hacer los promedios globales. Apoyémonos en una analogía muy simple para entender mejor esta equivalencia.

Considere, por ejemplo, la nota

definitiva, ND, obtenida por un estudiante, como resultado de promediar sus notas parciales. Supongamos que fueron cuatro exámenes parciales,  $(EP_i, i = 1, 2, 3 \text{ Y } 4)$  los que éste presentó. Así,  $ND = (EP_1 + EP_2 + EP_3 + EP_4)/4$ . La nota definitiva crítica es  $ND = 09$  ya que se puede esperar que se solicite un aumento de un punto para llevarla a diez y aprobar. ¿Qué significa elevar en un punto el valor de ND? Despejemos de la ecuación anterior cualesquiera de las notas parciales, por ejemplo,  $EP_4 = 4ND - EP_1 - EP_2 - EP_3$ . Hagamos un ejemplo numérico: pongamos que para que el estudiante le dé  $ND = 09$ , las notas parciales fueron  $EP_1 = EP_2 = EP_3 = 10$  Y  $EP_4 = 06$ . Si se le aumenta en un punto a ND para que este valga 10,  $EP_4 = 4 \times 10 - 3 \times 10 = 10$  puntos. En otras palabras, aumentarle de 09 a 10 la ND (diferencia de un punto), significa elevarle la nota del cuarto parcial de 06 puntos a 10 puntos, o sea, una diferencia de cuatro puntos, que puede equivaler a un problema que hizo mal o que no hizo.

En relación a la aproximación (1), un modelo un poco más elaborado pero aun todavía sobre-simplificado, que considera la atmósfera dividida en varias capas, pero con  $a = 1$  para una más rápida captación del modelo (radiación de cuerpo negro), permite tener una idea un poco más realista del problema.

### III. EL EFECTO DE INVERNADERO EN UNA ATMÓSFERA PLANETARIA ESTRATIFICADA

La observación del perfil de temperatura troposférica, entre la superficie y la tropopausa, indica una disminución de ésta con la altura en una cantidad que oscila entre los 60°C y los 80 0e. Esta disminución de temperatura puede ser explicada en principio con base a la transferencia de radiación en una atmósfera hipotética, discretamente estructurada en capas homogéneas plano-paralelas, teniendo cada una asociada una temperatura  $T_i$  (con  $i = 1, 2 \dots n$ ), tal que  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > \dots > T_n$  (Goody & Walker: 1975).

Cada una de estas capas debe tener un espesor tal que la radiación emitida por una debe ser absorbida por la adyacente. Así, las capas no deben ser ni demasiado gruesas ni demasiado delgadas. Dentro de este contexto, una capa será demasiado gruesa si la radiación es emitida y re-absorbida dentro de la misma capa. Por el contrario, una capa será demasiado delgada si la radiación la atraviesa, sin experimentar ninguna absorción. Por lo tanto, cada

capa tendrá un justo espesor necesario para absorber la radiación que le llega. Al aumentar la altura, la densidad de los gases absorbentes es menor, por lo que se espera que el espesor de las capas aumente también con la altura, permitiendo a la radiación viajar más lejos antes de ser absorbida.

El número total de capas en que una atmósfera puede ser dividida de esta manera, o bajo este criterio, se llama la *opacidad o espesor óptico*,  $\tau$ , de la atmósfera. Consecuencialmente, este espesor óptico depende de la cantidad de atmósfera que haya y de la eficiencia con que los gases atmosféricos absorben la radiación IR.

En el equilibrio consideremos el balance de energía entre la diferentes capas presentadas en la Figura 5 (Goody & Walker: 1975).

$$(S_0/4)(1-a) = \sigma T_c^4$$

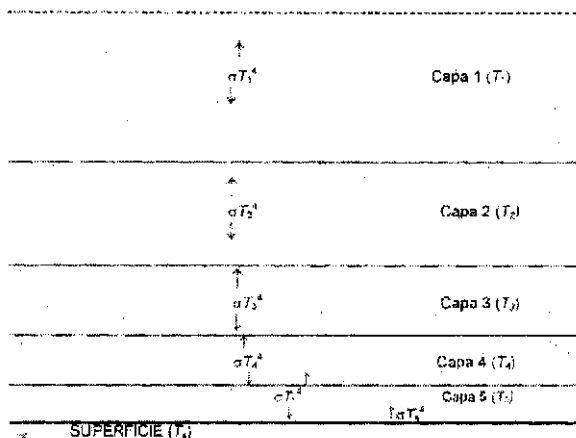


FIGURA 5

La capa 1, radiativamente hablando hace “contacto” con el espacio exterior, por lo que:

$$\sigma T_1^+ = \sigma T_c^+ , \quad (15)$$

de donde,  $T_1 = T_c$ .

El equilibrio radiativo en la capa 1 sugiere también que:

$$\downarrow\sigma T_1^+ + \uparrow\sigma T_1^+ = \downarrow\sigma T_2^+ \Rightarrow T_2^+ = 2T_1^+ = 2T_c^+ , \quad (16)$$

Igualmente, si se establece el balance de energía en la capa 2:

$$\downarrow\sigma T_2^+ + \uparrow\sigma T_2^+ = \uparrow\sigma T_3^+ + \downarrow\sigma T_1^+ \Rightarrow T_3^+ = 2T_2^+ - T_1^+ . \quad (17)$$

Haciendo uso de la relación (16) y (15),

$$T_3^+ = 4T_c^+ - T_c^+ \Rightarrow T_3^+ = 3T_c^+ . \quad (18)$$

En la capa 3 el balance de energía es:

$$\downarrow\sigma T_3^+ + \uparrow\sigma T_3^+ = \uparrow\sigma T_4^+ + \downarrow\sigma T_2^+ \Rightarrow T_4^+ = 2T_3^+ - T_2^+ \quad (19)$$

Aplicando simultáneamente las relaciones (18) y (16),

$$T_4^+ = 6T_c^+ - 2T_c^+ \Rightarrow T_4^+ = 4T_c^+ \quad (20)$$

A continuación en la capa 4:

$$\downarrow\sigma T_4^+ + \uparrow\sigma T_4^+ = \uparrow\sigma T_5^+ + \downarrow\sigma T_3^+ \Rightarrow T_5^+ = 2T_4^+ - T_3^+ . \quad (21)$$

Por aplicación de (20) y (18),

$$T_5^+ = 8T_c^+ - 3T_c^+ \Rightarrow T_5^+ = 5T_c^+ . \quad (22)$$

Finalmente, en la capa 5:

$$\downarrow\sigma T_5^+ + \uparrow\sigma T_5^+ = \uparrow\sigma T_s^+ + \downarrow\sigma T_4^+ \Rightarrow T_s^+ = 2T_5^+ - T_4^+ . \quad (23)$$

Con la relación (22) y (20), la ec. (23) se transforma en,

$$T_s^+ = 10T_c^+ - 4T_c^+ \Rightarrow T_s^+ = 6T_c^+ . \quad (24)$$

Las expresiones (16), (18), (20), (22) y (24) nos permiten encontrar una ecuación general de la temperatura superficial,  $T_s$ , en función del espesor óptico en el infrarrojo,  $\tau_{IR}$ , de la atmósfera:

$$T_s = (1 + \text{número de capas})^{1/4} T_c \Rightarrow T_s = (1 + \tau_{IR})^{1/4} T_c . \quad (25)$$

La variable “TIR, como se deduce de la expresión anterior, es adimensional, es decir, no tiene unidades” En el ejemplo que nos ocupa, el número de capas es igual a 5, por lo que el espesor óptico en el IR es igual a 5, con cada capa teniendo un espesor óptico individual igual a uno. Note, sin embargo, que a pesar de esto el espesor geométrico (altura) de la capa mas profunda, la que está en contacto con el suelo, es el menor puesto que esta capa es la mas densa. A medida que subimos de capa, la densidad disminuye por lo que para que tenga igual opacidad óptica, el espesor geométrico debe aumentar. La disminución de densidad debe ser compensada por un aumento del espesor geométrico de la capa; de allí que en la Fig. 5 la capa 1 es la mas gruesa y la capa 5 la mas delgada. Pero todas, individualmente, tienen una opacidad igual a uno. Por lo anterior, se puede afirmar .que, en general, el espesor óptico es proporcional a: (i) el espesor geométrico  $x$  de la capa (o altura en este caso), (ii) la densidad de los gases contenido en ella, y (iii) a la “eficiencia”  $K$  con que estos gases extingan (absorción + dispersión) energía radiante; por consiguiente, “ $t = KpX$ . Como esta variable no tiene dimensiones, y considerando que la unidad de densidad puede ser expresada en  $g/cm$ , y el espesor geométrico en  $cm$ , la unidad de  $K$  puede venir dada en  $[cm^2/g]$ .

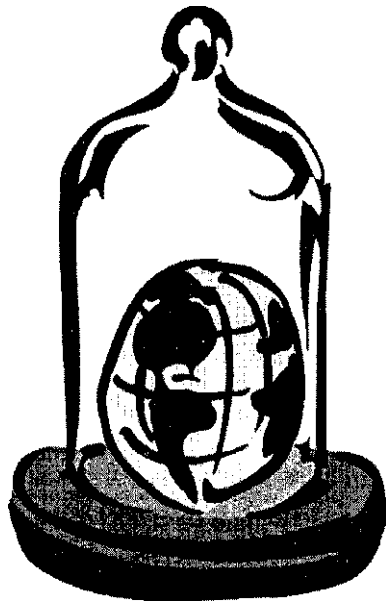
Es importante entender, entonces,

que por esta última definición, la opacidad o espesor óptico es un número que no necesariamente tiene que ser entero (como el valor de 5 de la Fig. 5). Considerando que  $T_e = 255 K$  y que  $T_s = 288 K$ , el cálculo muestra según la eco (25), que la opacidad media de la atmósfera en el infrarrojo es de aproximadamente 0,63. Evidentemente un aumento de esta opacidad por encima de este valor, debido a un aumento antropogénico de estos gases (por ejemplo,  $CO_2$ ), conllevará a un aumento de  $T_s$ . ¿Habrá aumentado o estará aumentado sostenidamente la opacidad de la atmósfera en el IR?

La eco (25), al igual que la ec.(10), son cada una representación matemática del efecto de invernadero natural de la atmósfera terrestre, en función respectiva de el espesor óptico en el IR (“tIR) y la emisividad (E.). Si la Tierra no tuviera atmósfera, o no contuviera gases absorbentes en el infrarrojo (gases invernadero), “tIR = E. = 0, X de ambas ecuaciones,  $T_s = T_e$ : no habría calentamiento global natural de la superficie. Pero como esto no es cierto, “tIR > 1, E. > 1 por lo que  $T_s > T_e$ . En este último caso, una alteración de esta condición (recalentamiento global: variación de la temperatura de radiación del globo terráqueo,  $T_e$ , como cuerpo en el espacio) puede venir expresada por la eco (20) la cual depende precisamente de  $E'$  (=11S/Se que, como se ha indicado, representa la fracción de la variación de Se en fun-

ción del flujo original), debido a una alteración en la concentración y/o composición del aire. Si no hay tal alteración,  $S_e = 0$ ,  $T_e = 0$  y por consiguiente,  $T_e = 0$ .

Según la ecuación (10), si la atmósfera fuera considerada como constituida por una sola capa (Fig. 1) Y emitiera como cuerpo negro ( $E_s = 1$ ),  $T_s = T_e$  (o  $T_s = T_e$ ). Por la ecuación (25), para una sola capa ( $\tau = 1$ ),  $T_s = T_e = [1 + \tau] T_e = 2 T_e = 2 \cdot 1,189 T_e$ . De momento este cociente es  $T_s/T_e = 288 \text{ K}/255 \text{ K} = 1,12910$  cual quiere decir que la atmósfera ni emite como cuerpo negro ni debe tener una opacidad óptica infrarroja de 1 (sino de 0,63 como se ha deducido arriba).



#### IV. CONSECUENCIAS DEL RECALENTAMIENTO GLOBAL: PARA MUESTRA, UN BOTÓN

El aumento sostenido de los gases-traza de la atmósfera, de tipo invernadero, como el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano), NO<sub>x</sub> (dióxido de nitrógeno), etc., por acción antropogénica, conduce, como se ha ilustrado, a un aumento de las temperaturas efectiva del planeta, atmosférica y superficial, respectivamente, como respuesta climática del sistema atmósfera-superficie mismo. Estas respuestas climáticas tarda su tiempo en manifestarse. En el caso del recalentamiento global, este puede tardar décadas en aparecer (Tabla 1). Este aumento de concentración de gases invernadero ha venido ciertamente sucediendo desde que comenzó la era industrial en el siglo XIX, por lo que los cambios climáticos que se ha venido observando, se le han atribuido a este efecto. Y esto está siendo sometido a estudio e intensos debates científicos.

Para ello se hacen proyecciones a futuro, bajo diferentes escenarios y condiciones, a base de modelos matemáticos.

En todo caso, este aumento de temperaturas trae como consecuencia la potencial alteración de prácticamente todo lo que ocurre en la atmósfera, litosfera, hidrosfera, biosfera y criosfera; ejemplo de ello sería la modificación del ciclo hidrológico (lluvias,

nubosidad, sequía, etc.), aumento del nivel del mar, descongelación de los polos y otras cosas mas (Erickson: 1992).

Tomemos como ejemplo la descongelación de los casquetes polares y el aumento del nivel del mar. Mostraremos con un sencillo ejemplo cuál podría el orden de magnitud de este efecto como secuela a largo plazo del recalentamiento global (Hafemeister: 1982).

Si se asume que un aumento global de temperatura media, causado por un aumento artificial de la concentración de  $CO_2$ , es amplificado en las regiones polares a unos  $5^\circ C$  (5 K), esto pueden desintegrar parcialmente los casquetes polares. Puede tomar de décadas a siglos para que una capa de hielo polar se descongele. La pregunta es ¿cuánto aumentará el nivel de los océanos, si inicialmente asumimos que solo la capa occidental de la Antártica es desgajada del Polo Sur y derretida por culpa de este aumento de temperatura?

Esta capa, que se formó hace unos 10 millones de años, puede tener una superficie de unos 1,5 millones de  $km^2$ , con un grosor o profundidad promedio de aproximadamente 1,5 km. El volumen de agua que podría provenir de esta capa es  $(1,5 \times 10^6 km^2) \times (1,5 km) \times (0,9 \text{ agua/hielo}) = 2,0 \times 10^6 km^3$ , donde el factor 0,9 indica la fracción de agua

que hay en el hielo (o sea, el 90% del hielo es agua y el resto, un 10%, es otra cosa). Este volumen de agua hay que esparcirla sobre el área inicial de los océanos, que es un 70% (0,7) de la superficie terrestre. Así, el nivel del mar subiría:

$$\frac{(2,0 \times 10^6 km^3)}{(0,7) \times (4\pi) \times (6400 km)^2} = 6m,$$

donde 6400 km es el radio promedio de la Tierra y la cantidad  $[(4\pi) \times (6400 km)^2]$  es la superficie del globo terráqueo (superficie de una esfera de radio  $r$ :  $4\pi r^2$ ). Este aumento del nivel del mar tendría carácter de desastre y calamidad; sería suficiente para que el 2% de los Estados Unidos quedara bajo el agua, en particular, el 30% de la península de la Florida y del estado de Louisiana, desaparecerían bajo las aguas. La desintegración completa de la Antártica y del hielo de Groenlandia podría tomar mucho mas tiempo y es mucho menos probable, pero en el supuesto negado que esto sucediera, el nivel de los océanos subiría hasta unos 100m.

Por cierto, esta diferencia de temperatura (global promedio) de  $5^\circ C$  es la misma que se estima ha habido entre la eras glacial e interglacial, cuyo período de retorno o recurrencia es del orden de millones de años. Por esta razón, la variación del nivel de los océanos, a causa de este fenómeno, que inundaría mundialmente las tierras bajas, es una posibilidad diferente.

## V. PREVISIONES Y PRECAUCIONES

Hay ciertas evidencias que parecieran indicar y advertir” que” el recalentamiento global terrestre ya está en marcha. Después de haberse detectado grandes fracturas y grietas en la capa de hielo del Polo Sur y la creación, por ello, del iceberg mas grande que jamás se haya observado, se ha llegado a sospechar que esto está siendo provocado precisamente por un aumento del efecto de invernadero (este singular hecho del iceberg, fue reseñado por los medios de comunicación social internacionales). Por otra parte, en la oscilación normal que tienen las temperaturas a lo largo de un año, se ha podido notar que en general las mínimas ya son tan mínimas, sino que han aumentado; en otras palabras, las temperaturas mínimas ya no están bajando a sus valores acostumbrados. Y esto también se le está atribuyendo al recalentamiento global. “En todo caso, lo que si es cierto es que la concentración de gases invernadero en el aire por acción de la actividad humana (quema de combustible fósil, quema de biomasa, etc.) ha ido en aumento, y esto plantea, como se ha ilustrado en este trabajo, un potencial efecto sobre el clima.

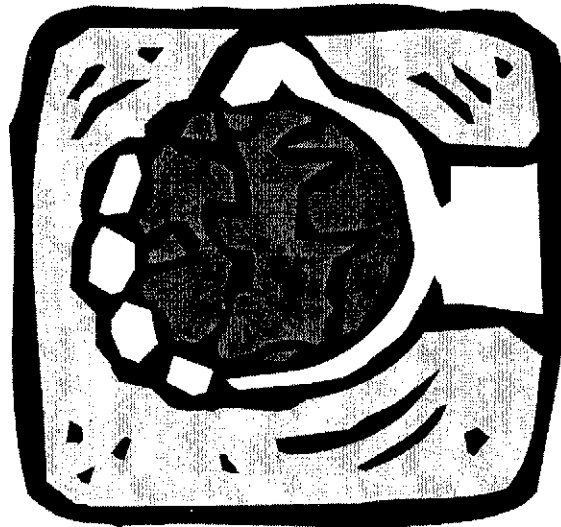
De ahí que una forma lógica de prevenir y atenuar o mitigar el problema es lograr una reducción de las emisiones de estos gases a la atmósfera.

Para ello a escala internacional, a través de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los países miembros firmaron el 13 de junio de 1992 un instrumento jurídico ambiental denominado “**Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**” cuyo objetivo general es (MRE/MARNR:2000),

*“Lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencia antropógenos peligrosas en el sistema climático, Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático. Asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible “,*

Este convenio, que tiene grandes implicaciones económicas y sociales para nuestro país, en virtud de su condición de país cuya economía es altamente dependiente de la exportación de combustible fósil, fue ratificado por Venezuela el 27 de diciembre de 1994 (Gaceta Oficial N° 4.825 Extraordinaria).

Para implementar este convenio, el mismo admite en su Artículo 17, la adopción de protocolos, y en su Artí-



culo 15, la de enmiendas. En este sentido, actualmente está bajo intensa discusión polémica el primero de ellos conocido con el nombre de “Protocolo de Kyoto”. Su objetivo general es (MRE/MARNR: 2000):\

*“Comprometer a los países industrializados a la reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero por lo menos en un 5% con relación a los niveles de 1990, para el período entre el 2008-20 12”.*

Estos dos instrumentos, junto con el “**Convenio de Viena para la**

**Protección de la Capa de Ozono**”, firmado el 22 de marzo de 1985 (ratificado por Venezuela el 19 de julio de 1988; gaceta Oficial N° 34010), Y su “**Protocolo de Montreal Relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono**”, firmado el 16 de septiembre de 1987 (ratificado por Venezuela el 11 de enero de 1989; Gaceta Oficial N° 34134), constituyen hasta el momento los mayores esfuerzos hechos a escala mundial para detener el daño que se le está haciendo al ambiente atmosférico, para protegerlo y para conservarlo.

El conocimiento detallado de estos documentos permite tener una idea completa de estos esfuerzos y de los obstáculos políticos, económicos, sociales, etc., que se han superado y que todavía hay que superar, para aplicarlos. Esto se deja como actividad opcional y complementaria al lector; hecho esto, sería interesante deducir, entonces, cuál es la diferencia entre un convenio y un protocolo.

## VI. COMENTARIOS FINALES

Con el entendido de que el problema es mucho más complejo, hemos hecho un intento para ilustrar y explicar tan simple como nos ha sido posible (ver aproximaciones hechas arriba), el fenómeno del recalentamiento global terrestre a través de un posible aumento del efecto de invernadero por contaminación artificial del aire, concebido básicamente como un aumento de la temperatura superficial del planeta con relación a su temperatura efectiva de radiación hacia el espacio. Lo hemos hecho apoyándonos en un simple modelo que considera a la atmósfera formada por una sola capa y por varias, en las que el balance de radiación entre la energía solar entrante y la energía infrarroja emitida por el sistema atmósfera-superficie, se ha establecido. Brevemente hemos revisado una de sus consecuencias por medio de un ejemplo sencillo, y hemos citado las gestiones que se están llevando a cabo para mitigar sus efectos.

Con este aporte, creemos estar en consonancia y estar honrado el compromiso adquirido por Venezuela, al ratificar el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que se encuentra contemplado en el Artículo 6 (Educación, Formación y Sensibilización del Público):

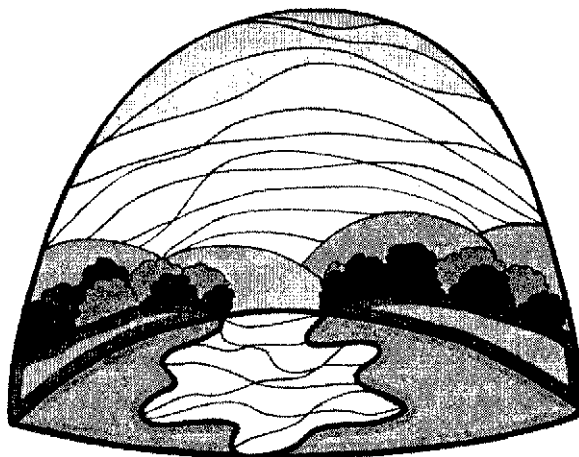
*“Al llevar a la práctica los compromisos a que se refiere el inciso i) del párrafo 1 del Artículo 4 las Partes:*

- a) Promoverán y facilitarán. en el plano nacional y. según proceda. en los planos subregional y regional, de conformidad con las leyes y reglamentos nacionales y según su capacidad respectivo:*
  - i. La elaboración y aplicación de programas de educación y sensibilización del público sobre el cambio climático;*
  - ii. El acceso del público a la información sobre el cambio climático y sus efectos;*
  - iii. La participación del público en el estudio del cambio climático y sus efectos y en la elaboración de las respuestas adecuadas; y*
  - iv. La formación de personal científico. técnico y directivo.*
- b) Cooperarán. en el plano internacional, y según proceda. por intermedio de organismos existen-*

*tes, en la actividades siguientes, y las promoverán:*

*i) La preparación y el intercambio de material educativo y material destinado a sensibilizar al público sobre el cambio climático y sus efectos; y*

*ii) la elaboración y aplicación de programas de educación y formación, incluido el fortalecimiento de las instituciones nacionales y el intercambio o la adscripción de personal encargado de formar expertos en esta esfera, en particular para países en desarrollo “.*





- Ackennan, T.P. (1992). A tutorial on global atmospheric energetics and the greenhouse effect. En *AIP Conference Proceedings 247, Global Warming: Physics and Facts* (B.G. Levi, D. Hafemeister, and R. Scriber, eds.). American Institute of Physics. New York; pp. 123.
- Alonso, S. y C. Ramis. (1996). Una pequeña introducción al estudio del clima de la Tierra y del cambio climático. *Revista Española de Física*, 10: 6-8.
- Aubrecht, G.J. (1988). Trace gases, CO<sub>2</sub>, climate, and the greenhouse effect. *The Physics Teacher*, March: 145-152.
- Erickson, J. (1992). *El Efecto Invernadero - el Desastre de Mañana, Hoy*. Serie Mc Graw-Hill de Divulgación Científica; 217 pp.
- Goody, R.M. y J.C.G. Walker. (1975). *Las Atmósferas*. Edic. Omega (Colección Fundamentos de las Ciencias de la Tierra). Barcelona; 150pp.
- Hafemelster, D.W. (1982). Science and society test VII: energy and environment. *American Journal of Physics*, 50: 713-720.
- Jones, M.D.H. y A. Henderson-Sellers. (1990). History of the greenhouse effect. *Progress in Physical Geography*, 14: 1-18.
- Knox, R.S. (1999). Physical aspects of the greenhouse effect and global warming. *American Journal of Physics*, 67: 1227-1238.
- Mitchell, J. (1990). Greenhouse physics. *Physics World*, June: 27-32.
- MRE/MARNR. (2000). *Acuerdos Multilaterales de Venezuela en Materia Ambiental*. Instituto de Altos Estudios Diplomáticos "Pedro Gual" (Min. Rel. Ext., MRE) / Oficina Sectorial de Gestión y Cooperación Internacional (Min. Amb. Rec. Nat. Ren., MARNR). Caracas; pp. 273-301, 449-473.
- OPS. (1980). *Manual del Aire en el Medio Urbano*. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Washington, D.C. (Cap. 1 ).
- Ramanathan, V. y J.A. Coakley. (1978). Climate modelling through radiative convective models. *Review of Geophysics and SpacePhysics*, 16:465-490.
- RSAS. (1997). *Ambio*, XXVI (1), February (Special Issue). The Royal Swedish Academy of Sciences (RSAS); 80 pp.
- Sagan, C. (1990). Croesus and Cassandra: policy response to global warming. *American Journal of Physics*, 58: 721-730.
- Stern, A.C., R.W. Boubel, D.B. Tumer y D.L. Fox. (1984). *Fundamentals of Air Pollution*. 2nd edition, Academic Press, New York (Cap.3: Scales of the Air Pollution); pp. 35-45.
- Vázquez-Abeledo, M. (1998). *La Historia del Sol y del Cambio Climático*. Serie McGraw-Hill de Divulgación Científica; 488 pp.
- Wilkins, L. (1993). Between facts and values: print media coverage of the greenhouse effect, 1987-1990. *Public Understanding of Science*, 2: 71-84.