

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES**

---

# Ozonosfera y posibles cambios climáticos

**DISCURSO**

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION

POR EL

EXCMO. SR. D. JOAQUÍN CATALÁ DE ALEMANY

Y

**CONTESTACION**

DEL

EXCMO. SR. D. JOSÉ GARCÍA SANTESMASES

EL DÍA 10 DE JUNIO DE 1981



M A D R I D

DOMICILIO DE LA ACADEMIA:

VALVERDE, 22.—TELEFONO 221-25-29

1 9 8 1

Depósito Legal: M.15.260 -1981

---

TALLERES GRÁFICOS VDA. DE C. BERMEJO - SANTA ENGRACIA, 122 - MADRID

# DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. JOAQUÍN CATALÁ ALEMANY

TEMA:

OZONOSFERA Y POSIBLES CAMBIOS CLIMATICOS

Excmo. Sr. Presidente  
Excmos. Sres. Académicos  
Señoras y Señores:

A mi entender, existen dos caminos que conducen a esta Casa ; uno es el breve, brillante y directo que es propio de los jóvenes y notables científicos y el que, seguramente, recorrísteis una mayoría de vosotros ; un segundo camino es el largo y azaroso que nos carga a la vez de años y experiencia y que hemos seguido otros. Pero aceptado este hecho que, en mi caso, por pura evidencia de las circunstancias tal vez resultara obvio, permitidme una afirmación, menos evidente, pero no menos cierta : pese a los años, acudo a vuestra llamada con el espíritu juvenil con el que siempre abordé cualquiera de las muchas tareas a las que tuve que enfrentarme. De modo que confío que entusiasmo y madurez unidos sean las características que me capaciten para aportar alguna contribución a las tareas de esta Corporación, dentro de las naturales limitaciones impuestas por las propias aptitudes, ya que no en vano he de reconocer que ha sido vuestra amistosa y cordial benevolencia, que no mis merecimientos, lo que me ha traído a colaborar con vosotros.

Introducción.

Dado que el puesto que he venido a ocupar es de nueva creación, y no pudiendo rendir el justo, tradicional y emotivo recuerdo a los que nos precedieron, permitidme que, en su lugar, lo sustituya por uno colectivo, para todos los que en esta Casa, y en diversas ocasiones, me honraron con su confianza ; a todos ellos, ausentes y presentes, quisiera expresar mi emocionada y sincera gratitud, como discípulo, en algunos casos, y compañero y amigo, en todos.

Este mismo sentimiento de gratitud es el que justifica la elección del tema que voy a desarrollar pues, hace ahora unos treinta y seis años, me fue sugerido por un inolvidable Miembro de esta Academia, ya fallecido, D. José Baltá Elías, y que entonces abordé en plan casi bibliográfico (1), pero que, posteriormente, con diversas

vicisitudes e intensidad, seguí desarrollando, pues se da el caso que el tema inicial, lejos de perder actualidad e interés, los fue ganando, por sus distintas facetas e implicaciones, a lo largo de los años, hasta el extremo que hoy aparece ligado al apasionante problema de las posibles alteraciones climáticas, de origen antropogénico, en virtud de perturbaciones que ciertas actividades humanas determinan en nuestra atmósfera. Lo cual, sin duda alguna, pone de manifiesto la perspicacia y visión de futuro de quien me puso sobre la pista de un tema de tan permanente, como polifacética, actualidad.

Me estoy refiriendo al problema del ozono atmosférico, tanto troposférico como estratosférico, del que empecé a ocuparme allá por los años cuarenta, volvió a exigir buena parte de mi dedicación por los sesenta (2) y de nuevo se impuso a mis normales actividades investigadoras, a partir de los setenta y tantos...; y en cada ocasión el tema del ozono surgió por razones distintas y con facetas diferentes, aflorando de nuevo, desde casi el olvido, a la máxima actualidad científica.

No voy a cansaros con los detalles de la historia del ozono, que a veces pienso que bien podría ser la pequeña historia de mi propia vida científica, porque, aparte de que ya ha sido contada en otro lugar (3), lo que hoy más interesa es lo que se refiere a los posibles cambios o alteraciones climáticas de origen antropogénico, en virtud de las perturbaciones que las actividades humanas determinan en nuestra estratosfera, donde el ozono precisamente tiene su centro de gravedad.

El clima, según la reciente definición del Programa Climático Mundial (4), «es la síntesis del tiempo, a lo largo de un período lo suficientemente largo para que sea posible establecer sus propiedades estadísticas globales (valores medios, varianzas, probabilidad de sucesos extremos, etc.) y es, en gran parte, independiente de cualquier estado instantáneo»; pues bien, el clima siempre afectó a las actividades de la humanidad, pero parece cada vez más evidente que el propio hombre ha entrado en juego, a través de sus actividades, y está contribuyendo a cambios que, por el momento, no me atrevo a calificar de climáticos, pero que con frecuencia redundan en su propio detrimento.

Téngase en cuenta que una propiedad muy importante del clima es que siempre estuvo variando y lo hizo a diversas escalas temporales, desde horas a milenios, ya que tal tendencia a la variabilidad

Clima; su variabilidad y perturbaciones; modelos.

procede de mecanismos estocásticos, totalmente interiores al propio sistema climático y a los que superponen otros mecanismos forzados, no aleatorios, de modo que la dificultad reside en separar los efectos debidos a ambos; por lo tanto, los cambios climáticos no constituyen una novedad; lo que tal vez pueda serlo es, por un lado, la escala de tiempos involucrada en el cambio, y, por otro, el interés que en la última década surgió entre el público, comunidad científica y gobiernos, en relación al tema. ¿Qué es lo que motiva o justifica tan repentino y generalizado interés por los cambios climáticos? De acuerdo con R. G. Feagle (5), tres han sido los factores determinantes.

En primer lugar, los grandes progresos alcanzados en nuestra capacidad de observar y medir factores climáticos e investigar los posibles mecanismos involucrados, a través de la posibilidad de elaborar modelos capaces, hasta cierto punto, de simular cambios, a partir de datos actuales. En segundo lugar, el hecho de que ciertas actividades humanas están afectando a la atmósfera en diversas formas, y en tercer lugar, por la creciente evidencia de cuan vulnerable resulta nuestra sociedad, frente a cualquier desajuste externo, ya sea climático o de otro tipo, en virtud de su creciente complejidad e interdependencia tecnológica. Los impactos del tiempo anómalo, y del clima, dependen de la capacidad de recuperación, o resiliencia del propio sistema social, frente a determinada anomalía o impacto, y dicho factor depende, a su vez, de otros muchos (densidad de población, capacidad de almacenar reservas, complejidad de la producción y distribución, eficiencia administrativa y gubernamental, etc.), y, en consecuencia, pueden diferir ampliamente de una a otra región y de un sistema social a otro.

El estudio de los climas, en el pasado, pone de manifiesto sus innumerables facetas, tanto dentro del propio sistema climático, como en las interacciones con su entorno; tal estudio nos da base para abordar el futuro, pues del mismo se deducen cinco generalizaciones, como subrayan los autores de «Lecciones del pasado» (6), que son importantes, en nuestro caso: 1) el clima es variable, 2) influye sobre el entorno y sobre las actividades humanas, 3) opera como sistema, 4) las anomalías pueden tener carácter recurrente y 5) el hombre es responsable de la mayor parte de sus problemas climáticos.

De cualquier forma, sin arriesgarnos a afirmar, de entrada, que las actividades humanas determinen, o no, alteraciones climáticas,

es evidente que producen «perturbaciones» del clima. Puesto que nuestra atmósfera es un fluido en permanente movimiento, que tiene lugar sobre una tierra en rotación, y que el motor de todos los movimientos atmosféricos tiene su origen en el balance energético entre la radiación que llega desde el sol y la radiación que la tierra, y la propia atmósfera, reexpiden al espacio, no es de extrañar que las características más notables de la atmósfera sean sus movimientos y sus cambios; tales movimientos determinan lo que denominamos «el tiempo», mientras que los cambios que ocurren estacionalmente, de año en año, o de década en década, nos proporcionan los valores estadísticos que denominamos «clima». Este, pues, viene determinado por un complejo sistema global del que la atmósfera es tan solo una parte; el sistema global incluye: atmósfera-océanos-tierras y criosfera. La dificultad con que se tropieza cuando se trata de predecir climas futuros es que apenas conocemos, en realidad, las causas naturales de cambios climáticos, ni disponemos de modelos adecuados para hacer predicciones, dado el gran número de variables, muchas de ellas ocultas, que deberíamos tener en cuenta, para incluir las múltiples interacciones entre los componentes del citado sistema global que, a parte de no ser lineales, vienen complicadas por la existencia de numerosos, y mal conocidos, mecanismos de retroalimentación.

Ha sido demostrado que la complejidad del sistema climático (7) es tal que no cabe predecir, con razonable seguridad, el valor de una determinada variable para un cierto día con una antelación superior a 2 ó 4 semanas y esto nos parece ya muy optimista, aún en el caso de recurrir a los modelos más sofisticados, como son los modelos CGA, o de Circulación General Atmosférica, en los que la resolución horizontal es de unos 200 km. y se consideran hasta 25 niveles, entre el suelo y la estratosfera superior. Ello se debe, fundamentalmente, a dos razones: la primera es que nuestro conocimiento del estado de la atmósfera es insuficiente, con vistas a la elaboración de modelos en los que estén representados todos los procesos físicos de importancia relevante, y la segunda es que el dato de partida, el instante cero, nunca es suficientemente conocido y, dos modelos que parten de dos estados atmosféricos que difieran infinitesimalmente entre sí, dan lugar a predicciones rápidamente divergentes. Pero esta incapacidad de llevar a cabo una predicción detallada, a largo plazo, no significa, forzosamente, que no sea posible desarrollar modelos climáticos que permitan anunciar «tendencias», como por ejem-

plo el ritmo a que puede ir variando la temperatura media del aire junto al suelo.

Estos modelos recurren al uso de expresiones matemáticas de las leyes físicas básicas (8): conservación de masa, energía y cantidad de movimiento; la complejidad del sistema de interacciones mutuas existentes, junto con la escala del sistema en estudio y las propias limitaciones impuestas por la capacidad y velocidad del ordenador, imponen serias restricciones y aunque no quiero insistir en este tema porque entre los presentes hay personas más capacitadas para hacerlo, es evidente que ello obliga a omitir, explícitamente, el tratamiento de muchos procesos a pequeña escala, tales como la nubosidad, pues aunque sean de gran importancia climática, no cabe pensar en modelos que los tengan en cuenta; en estos casos lo que se hace es recurrir a la parametrización, que permite dar entrada a la variable por sus propiedades estadísticas y es la calidad de tal parametrización la base fundamental del modelo climático elaborado.

Pero a este respecto debemos hacer una importante consideración: todo modelo debe ser sometido a prueba, comparando sus previsiones con la realidad, y es bien sabido que no existen registros climáticos fiables y detallados más que desde hace unas pocas décadas y esto tan solo para los países más desarrollados, lo que quiere decir que carecemos casi de toda información digna de crédito, respecto al 90 % de la superficie del globo. De modo que de acuerdo con un bien conocido teorema, queda muy restringida nuestra capacidad para convalidar un modelo climático, ya que si queremos describir, con precisión, una serie temporal debemos observarla, por lo menos, en una extensión igual al doble de su período; así, por ejemplo, los supuestos efectos climáticos relacionados con el ciclo solar de 11 años, precisan para ser aclarados registros meteorológicos de 22 años, por lo menos; asimismo cualquier modelo que tratara de simular una fluctuación térmica de  $\pm 1^\circ \text{C}$ , con período de 80 y 180 años, puesta de manifiesto por los núcleos de hielo de Groenlandia, en caso de que se tome como indicadora de una fluctuación térmica global natural, tendría que esperar el doble número de años, antes de que pudiera recibir su convalidación.

No es pues de extrañar que tan solo sean unas pocas instituciones, en todo el mundo, las que afronten la elaboración de modelos climáticos, con vistas a predecir los posibles cambios naturales con objeto



de poder poner de manifiesto la contribución de efectos antropogénicos, que es el problema que quisiéramos desarrollar.

Son muy numerosos los ejemplos de evidentes alteraciones climáticas debidas a nuestra propia civilización tecnológica; bien conocido es, por ejemplo, el hecho de la existencia de islas térmicas urbanas, puesto de manifiesto en múltiples casos y circunstancias (9), y que nosotros hemos encontrado también en Madrid, al comparar los sondeos termodinámicos llevados a cabo en el aeropuerto de Barajas y en el centro de la ciudad: en los primeros 300 ó 400 metros, la temperatura del aire es, en promedio, de unos 2 a 4° C superior en la ciudad (10), de modo que hasta dicha cota, por lo menos, se manifiesta claramente el efecto de la urbe. Otro ejemplo clásico frecuentemente citado es el que se refiere al centro de Columbia, en Maryland (11), que en 1968 no estaba ni más caliente, ni frío que su entorno rústico; en cambio, en 1974, tras un día claro y en calma, la temperatura al atardecer era 4° C superior a la del entorno, y para 1980 se calculaba que el calentamiento sería de unos 6° C. ¿Qué es lo que allí ocurre? En 1968 era un cruce de carreteras, con 200 habitantes, que en 1978 se había convertido en un centro urbano de 20.000 habitantes y se espera lleguen a 100.000 en una década.

Menos conocido, y más controvertido, es el hecho de que el régimen pluviométrico en las urbes resulte alterado por el creciente aumento de su polución, ya que ésta, al actuar como foco de nuevos núcleos de condensación-precipitación, determina alteraciones sensibles en la distribución diaria de las precipitaciones, a lo largo de los días de la semana, como pone de manifiesto un estudio reciente llevado a cabo por nosotros, en Madrid (12), donde al representar la media diaria de precipitación, para cada día de la semana, y para la década de los años 70, destaca claramente un mínimo, bastante acusado, que corresponde a los fines de semana, frente a una distribución, casi uniforme, para el resto de los días de la semana donde, acaso, parece existir un valor ligeramente superior, alrededor de miércoles o jueves. Si, por otra parte, estudiamos la variación paralela que experimenta la concentración de partículas materiales, en la atmósfera urbana, a lo largo de la semana y para la misma década, destaca también un acusado mínimo, en sábados y domingos, en que como es natural, la polución urbana es menor, y un claro máximo, coincidente con el de las precipitaciones, a mitad de semana. Esto parece justificar plenamente la alteración del régimen pluviométrico

bajo la influencia de la actividad de una urbe. Por si pudiera existir alguna duda, digamos que al recurrir al registro pluviométrico de Madrid, para la década de los cuarenta, cuando no había surgido todavía el problema de la polución, o por lo menos no en la acuciante forma actual, resulta que la precipitación media diaria se mantiene, prácticamente, constante a lo largo de los siete días o, en todo caso, parece algo superior los sábados y domingos, como si quisiera justificar lo que se decía en una vieja canción inglesa de «que siempre llueve los domingos». Y por si alguien pudiera calificar estos resultados de mera coincidencia estadística, quisiera recordar que algo análogo parece demostrar un trabajo llevado a cabo en París (13).

Todo ello, por otra parte, resulta muy natural, dada la estrecha correlación existente entre las condiciones meteorológicas y el problema de la contaminación, como claramente se pone de manifiesto por el hecho de que en Madrid, p. e., resulta mucho más eficaz, con vistas al disfrute de bajos niveles de polución, la presencia de vientos serranos que cualquiera de las múltiples medidas que la Administración, sin contar apenas con la meteorología, suele adoptar.

A este respecto puede resultar interesante recordar un trabajo, publicado en los Anales de esta Academia y en volumen homenaje a nuestro Presidente; en el mismo (14), recurriendo a un índice de calidad del aire, por entonces, recientemente introducido por el *Oak Ridge National Laboratory*, se llamaba la atención sobre el alto valor que dicho índice de riesgo alcanzaba en la atmósfera urbana de Madrid, durante los años 73-76, en que en diversas ocasiones el problema de la contaminación reclamó la urgente atención de la Administración, ante el clamor popular, y se empezaron a tomar tímidas medidas de prevención, cuya escasa eficacia se pone de manifiesto en cuanto surgen condiciones meteorológicas adversas, es decir poco favorables a la dispersión.

Que esto no son simples palabras, sino hechos concretos, lo demuestra un modesto trabajo, últimamente presentado (15), en el que se calcula el índice de calidad del aire, con el criterio de Oak Ridge, valor promedio anual, para la década de los años 70, y su evolución es comparada con la que, durante los mismos años, experimentó otro índice, introducido objetivamente por nosotros, para valorar la incapacidad difusora de la atmósfera, expresada por su valor medio anual, a lo largo de los mismos años; pues bien, claramente destaca el hecho de que existe una perfecta concordancia entre los máximos y

La reglamenta-  
ción ambien-  
tal requiere in-  
vestigación.

mínimos de ambas gráficas, lo que demuestra que la calidad del aire depende bastante más de la Providencia, disfrazada de meteorología, o poder difusor favorable, que de la Administración, en forma de legislación que, por lo general, encuentra bastante más sencillo recurrir a normas restrictivas o soluciones importadas, que justificar sus propias decisiones en un concreto análisis del problema, a través de la propia investigación.

En el problema que nos preocupa, la tecnología y la meteorología de importación, aunque de fácil logro, resultan de poca, por no decir de nula, utilidad, con vistas a la oportuna legislación. Esta no debe tratar de ahogar, a priori, con el consabido «quien contamina paga» o por el clásico «desarrollo cero», que es lo fácil, ni por un cúmulo de normas restrictivas, impuestas tras una rápida mirada al exterior, que a veces tiene tan solo carácter bibliográfico, sin la adecuada base científica aportada por la propia investigación, como si, aparentemente, el secreto de una mejor calidad ambiental dependiera de leyes y nuevas leyes, cuyo cumplimiento tampoco va a ser preciso que se exija, pues lo que se hace es caer en la trampa de pensar que la sabiduría universal ¡e interdisciplinar! del legislador, generalmente alejado de las escenas justificantes de la acción, se haga cargo de la inmoralidad que representa la destrucción ambiental.

A este respecto quisiera recordar las «Leyes sobre reglamentación ambiental» jocosamente introducidas por Sawyer (16), para fustigar a la legislación norteamericana y que a mi entender vienen a completar las bien conocidas reglas de Parkinson, referidas a la Administración, en general. Las normas son 14, pero me limitaré a citar solo algunas de ellas que, como muestra, son lo bastante elocuentes:

1. Si una norma es buena, dos serán mucho mejor.
3. Cuanto más restrictiva sea una norma, tanto mejor.
4. Los costos de idear y hacer cumplir una norma, deben superar a los beneficios que produzca.
5. Las normas deben estar redactadas en un lenguaje de «específica ambigüedad», con objeto de poder alimentar a un ejército de abogados, políticos, administradores, semánticos, coordinadores, y toda la burocracia adicional.

10. Una norma debe estar redactada de forma que un amplio espectro de políticos, pueda, a la vez, elogiarla o condenarla, de acuerdo con la más reciente opinión de sus electores.

13. La eficacia de una norma puede medirse por los decibelios y la temperatura del clima adverso que produce.

Pensemos en que esta jocosa parodia de legislación trata de criticar un estado de cosas, en EE.UU., donde la investigación no es la Cenicienta de los presupuestos del Estado, ni la ignorada o ausente en los debates parlamentarios; se aplica, con mucha mayor razón a otras latitudes, en las que nunca la investigación propia va por delante de la legislación. Y no se piense que estas consideraciones nos alejan del tema del ozono pues, precisamente, donde más se echa de menos esta investigación, por delante de cualquier norma legislativa, es cuando del problema de la contaminación troposférica, pasamos a la estratosfera, en el que nuestro protagonista juega un preponderante papel y donde las alteraciones del medio, precursoras de posibles alteraciones climáticas, son más importantes pues, como veremos, la resiliencia del medio y su capacidad de recuperación son casi desconocidas, aunque, desde luego notablemente menores y mucho más lentas que las correspondientes a las capas inferiores de la atmósfera, cuya gran capacidad de recuperación es de todos conocida, como lo demuestra la eficacia con que nuestro aire de la sierra actúa, con y sin la adecuada ayuda de la legislación.

Puesto que nuestro propósito es tratar de las posibles alteraciones climáticas ligadas al contenido de ozono atmosférico, bueno será que recordemos el importante papel que este gas desempeña en la atmósfera terrestre, y en los diversos procesos que su presencia determina; algunos de estos son bien conocidos, pero otros todavía son objeto de especulación y de activa investigación.

Recordemos, para empezar, que la cantidad total de ozono en la atmósfera, reducida a condiciones normales, representa tan solo una capa de 3 a 4 mm. de espesor; dicho en otra forma, su concentración en la atmósfera es del 0,0001 %; si a pesar de esto se habla, como es bien conocido, de la ozonósfera, al referirse a tan insignificante cantidad de gas atmosférico, ya se comprenderá que su presencia debe desempeñar un papel preponderante, en muchos de los procesos físicos que ocurren en la atmósfera.

Papel del ozono en la atmósfera.

Bien conocido es, por cierto, el papel de tal capa, en relación a la radiación solar ultravioleta, gracias a la que se origina en la estratosfera, bajo la acción de la radiación U. V. de 175-195 nm, que produce la disociación del oxígeno, y la consiguiente formación del ozono, en presencia de un agente catalítico. Su concentración no

aumenta indefinidamente, debido a que se establece un equilibrio fotoquímico entre su formación y su destrucción; esta última tiene lugar gracias a la fuerte absorción que presenta entre los 200 y 300 nm (bandas de Hartley y de Huggins). El ozono formado durante el día, no puede ser destruido durante la noche, en ausencia de la radiación solar U. V.; del mismo modo que el que contenga el aire descendente, hacia la baja estratosfera y troposfera, no puede descomponerse, ya que la propia capa de ozono, que tiene encima, a modo de sombrilla, evita que le alcance la radiación U. V que lo reduciría. Su concentración, en equilibrio, es tal que impide la penetración hacia las capas bajas de la atmósfera de aquellas radiaciones U. V que determinan serias quemaduras y graves alteraciones cutáneas, pero, por otra parte, si fuera mayor, no sería posible que llegara hasta la superficie terrestre la radiación U. V, indispensable, por ejemplo, para la síntesis de la vitamina D.

Por otra parte, una reducción en la cantidad de ozono existente en una columna vertical, desde el suelo hasta la estratosfera media y alta, determina un notable aumento específico de la radiación UV-B (o radiación con efectos biológicos sobre el material que lleva la información genética de las células vivas, el DNA, que corresponde a longitudes de onda comprendidas entre los 290 y 320 nm.) recibida sobre la superficie terrestre; ahora bien, cálculos teóricos demuestran que entre los porcentajes de variación que experimenta el ozono y los correspondientes de la radiación UV-B, junto al suelo, existe una relación variable entre 1,5 y 2, y esto quiere decir que una supuesta reducción del 10 %, en la cantidad de ozono, representaría un aumento de casi el 20 %, en la UV-B recibida. Pero aun hay algo más, este factor global resulta proporcionalmente mayor para las longitudes de onda más cortas, ya que la eficacia relativa de un cuanto de radiación UV-B, en sus efectos nocivos sobre las células vivas, pasa de 0,02 para 330 nm, a 1,4 para 315 nm, 65 para 300 nm, y llega a ser de 100 para los 297 nm que es la longitud de onda respecto a la que vienen expresadas o normalizadas las eficacias relativas de las radiaciones; a partir de tal longitud de onda la eficacia nociva de las radiaciones UV disminuyen rápidamente. Ya tenemos pues una primera idea del porque resulta tan peligroso perturbar el equilibrio, producción-destrucción, del ozono estratosférico, así como de la urgente necesidad de completar el mapa climático de radiación UV-B, que por el momento consta de muy pocos datos, casi todos

correspondientes a la U. R. S. S., donde al parecer existen mapas o atlas climáticos de radiación U. V, desde 1968; el ampliarlos a escala mundial requiere una amplia colaboración internacional propugnada por los expertos de la OMM (17), quienes consideran indispensable una constante vigilancia, mediante una red mundial de 30 a 40 sensores de radiación UV-B, adecuadamente distribuidos, pues resulta más factible controlar posibles variaciones de dicha radiación que las que pueda experimentar la causa que las determina, es decir las del propio ozono.

Por otra parte, la distribución vertical del ozono en la atmósfera es tal que, en promedio, su centro de gravedad se sitúa alrededor de los 18 a 30 km., zona hasta la cual pueden llegar, como veremos, perturbaciones debidas a diversas actividades humanas.

Pero además, el ozono desempeña, en la atmósfera, otros papeles muy importantes. A pesar que por algún tiempo fue considerado, por muchos, como un simple elemento trazador, y de hecho lo es en diversos problemas meteorológicos, pues el ozono viene a ser como un indicador de las masas de aire y de su procedencia, sucede también que tal pequeña cantidad de gas es la responsable del equilibrio térmico radiativo de la estratosfera y, en consecuencia, de la distribución vertical de la temperatura con la altura, como se demostró, hace unos años (18), al estudiar tal distribución; en el supuesto de que solo contribuyeran a ella el vapor de agua y el anhídrido carbónico, en equilibrio radiativo, se obtenían teóricamente temperaturas, para la estratosfera, a los 40 km (unos 2,3 mb), del orden de los 140 K, en contradicción con las temperaturas realmente observadas que son del orden de los 260 K; en cambio, al tener en cuenta, también, la presencia y la distribución vertical del ozono, así como su contribución al equilibrio térmico, tanto para la radiación solar (o de longitud de onda corta), como la terrestre y atmosférica (longitud de onda larga), pudo justificarse la razón del bien conocido aumento de temperatura que se registra en la baja estratosfera, entre los 15 y 40 km, desde los 185-190 K a los 260 K, y del que es evidentemente responsable el ozono. Otra vez nos encontramos pues con que las posibles alteraciones de la concentración de ozono, pueden dar lugar a arriesgados cambios térmicos que, cómo no, se reflejarían, a mayor o menor plazo, en la biosfera, pues aunque un modelo teórico de la estructura de la atmósfera (19) demuestre que la temperatura de la tropopausa no depende directamente del ozono, parece lógico que

indirectamente dependa, a través del equilibrio radiativo estratosférico.

Otra conclusión muy interesante (18), especialmente para la meteorología práctica, es que el equilibrio térmico radiativo, en la estratosfera se alcanza con relativa lentitud, pues el tiempo de relajación térmica, a los 20 km, es de unos 26 días y a los 30 km de unos 17 días; por lo tanto, es evidente que la oscilación térmica, día-noche, asociada a la variable absorción por el ozono de la radiación solar U. V, debe ser imperceptible, salvo en la noche polar, cuya duración es muy superior al citado tiempo de relajación. Por último, para poner fin a estas consideraciones acerca de la importancia de la ozonosfera, debemos mencionar los efectos dinámicos del ozono en el seno de la atmósfera, o más concretamente su papel en la circulación general atmosférica, inducida, hasta cierto punto, por el propio gas. Visto el calentamiento radiativo estratosférico determinado por el ozono, es evidente que, en gran parte, dicho gas determina, asimismo, el campo térmico allí existente y, en consecuencia, a su vez, el campo bórico, por lo que es muy posible que el mismo ozono sea el factor principal determinante de la propia circulación general, de acuerdo con una cadena de procesos, insuficiente e imperfectamente conocidos, pero que esquemáticamente podemos establecer así: Formación del ozono → transporte del mismo por la circulación general → alteraciones del campo térmico y bórico → reconstrucción de la circulación → redistribución del ozono en la atmósfera (20). De acuerdo con este esquema se nos ocurre que en cierto sentido cabría decir que bien pudiera ser considerado el ozono como «causa» y a la vez «efecto» de sí mismo; con esta pequeña exageración, solo pretendemos subrayar la rara y extraordinaria influencia de tal gas en los procesos atmosféricos y, en último término, la importancia de la estratosfera y el riesgo que entrañan las alteraciones que en ella puedan provocar las actividades humanas; otros autores más prudentes y dignos de crédito opinan que (21): «el ozono ha dejado de ser un elemento trazador pasivo de la dinámica atmosférica, y se ha convertido en su «primer motor» o, en algún caso, su principal obstáculo...», lo que, a fin de cuentas, es lo mismo.

En el campo del medio ambiente, el problema de las variaciones climáticas fue ganando interés entre especialistas de las distintas ramas de la ciencia, al comprobar que existen mecanismos capaces de producirlas a una escala que puede variar desde centenares de millones de años (como es el caso del arrastre continental), hasta el normal periodo de la rotación terrestre.

El informe del GARP (Programa de Investigación Global Atmosférica), de la OMM, señala catorce posibles factores o causas de tales alteraciones, pero subraya que se limita a insistir sobre aquellos cuyos efectos pueden ser acusados antes del final del presente siglo (22); sin embargo no está claro cual, de entre ellos, puede ser el más importante, a escala de unas décadas, bajo la creciente influencia de las perturbaciones introducidas por las actividades humanas.

Kellog (23), autor de un importante y exhaustivo informe sobre este tema, comienza el mismo diciendo que a pesar de que parece existir entre la comunidad científica una comprensible resistencia a entrar en un debate abierto sobre tal tema, y pese a que la tarea no resulte grata, la cuestión es ineludible, ante la creciente magnitud de las interferencias humanas sobre la biosfera, de modo que pasa revista a todas ellas, en un intento de llamar la atención acerca de sus posibles, más o menos predecibles, efectos. Los supuestos y las conclusiones contenidos en tal informe, posiblemente, no merezcan la aprobación general, pero de cualquier forma representa el punto de vista de quienes más han meditado acerca del tema de los cambios climáticos y de las posibles influencias humanas sobre los mismos, por lo que, en todo caso, resulta ser un ineludible punto de partida para cualquier tipo de investigaciones futuras.

Dejando aparte las fluctuaciones internas que con períodos largos existen en el sistema atmósfera-océanos-continentes-criosfera-biosfera, cabe distinguir tres factores generales, capaces de dar lugar a las alteraciones climáticas: 1) Variaciones de la constante solar, 2) la transformación de las propiedades de la superficie terrestre (incluyendo variación de albedo y emisiones térmicas) y 3) las variaciones de la composición de la atmósfera, incluyendo aerosoles y gases.

Observaciones recientes, desde satélites y sondas, han puesto de manifiesto tan solo insignificantes variaciones de la constante solar global, así como otras, bastante más acusadas e importantes en sus componentes corpuscular, ultravioleta lejana y rayos X (24), y aunque la posible correlación entre la actividad solar y el clima, sigue siendo muy discutida, por el momento lo único que parece relativamente evidente es la influencia de los conocidos ciclos de actividad solar, de 11 y 22 años, sobre el régimen de temperaturas, precipitaciones y tormentas. Posiblemente, son muchos otros los parámetros atmosféricos, a todos los niveles, cuya variabilidad está ligada a las del sol (p. e. la vorticalidad a 500 mb., en el hemisferio norte, parece



experimentar una disminución del 10 %, coincidiendo con los períodos en que el viento solar arrastra hacia la tierra los límites del sector magnético del sol), pero hasta el momento no se conocen mecanismos convincentes, mediante los que la actividad solar pueda afectar al clima y mucho menos a corto plazo, que es lo que más puede interesarnos. Es evidente, como nos recuerda V. Domingo (24), que las relaciones sol-tierra sólo podrán ser comprendidas cuando tengamos una idea clara de la dinámica de la atmósfera media y superior; solo entonces la física de la atmósfera estará preparada para realizar grandes progresos, a partir del estudio del efecto que las variabilidades solares determinan en cada uno de los diversos niveles atmosféricos.

Por otra parte, la variación del albedo, así como de las restantes propiedades de la superficie terrestre, pueden tener considerable importancia, pero probablemente más en términos de microclimas o anomalías de corto período, en climas de zonas aisladas, que a efectos globales.

Así pues, a escala global, la interpretación de los posibles cambios climáticos se centra sobre las variaciones de la composición de la atmósfera y las correspondientes actividades humanas capaces de ocasionarlas. La física de este problema comprende la influencia de la variación de composición atmosférica, sobre la divergencia del flujo radiativo y el efecto invernadero.

Es bien sabido que el equilibrio radiativo en la atmósfera viene ampliamente determinado por sus componentes ópticamente importantes: vapor de agua, dióxido de carbono, ozono y aerosoles. Aunque la atmósfera es relativamente transparente para la radiación solar, resulta prácticamente opaca para la radiación terrestre, en virtud de la fuerte absorción que se debe al vapor de agua, entre 5 y 8 micras y al CO<sub>2</sub> entre 14 y 17 micras; en consecuencia, la presencia de éstos gases evita, en gran parte, que la radiación térmica, terrestre y atmosférica, escape al espacio; en esto consiste el bien conocido «efecto invernadero». Sin embargo, existe una pequeña zona, entre las 8 y 13 micras, para la cual tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono son transparentes (no así el ozono que presenta una banda de absorción entre 9 y 10 micras), y que recibe el nombre de «ventana de la atmósfera»; en ella, como es natural, la emisión de la atmósfera es mucho menor que la terrestre que, por lo tanto, logra escapar a través de la ventana. Por esta razón resulta tan importante conocer las propiedades ópticas de los componentes, y contaminantes, de la

El efecto invernadero y la ventana de la atmósfera; actividades perturbadoras.

atmósfera, en dicha zona del espectro o «ventana», e investigar la naturaleza física del efecto invernadero, así como su variabilidad, en presencia de otros gases y su relación con el clima que, a fin de cuentas, viene determinado, directa o indirectamente, por el balance térmico entre la energía solar entrante, y la terrestre que escapa al espacio.

Nosotros nos limitaremos a analizar las alteraciones que pueden venir determinadas por las variaciones experimentadas por las concentraciones del ozono y otros gases, en la estratosfera; observemos, de paso, que si bien en la citada ventana, el ozono presenta una banda de absorción (a 9,6 micras), dada la pequeña concentración de tal gas, en las capas bajas, puede ignorarse tal absorción en el tratamiento del equilibrio radiativo en la troposfera, pero no así en el de la estratosfera media y baja, donde la concentración de ozono es más importante. Por esta razón el ozono, conjuntamente con otros gases estratosféricos, que presenten bandas de absorción en el intervalo que hemos denominado ventana de la atmósfera, contribuye a alterar la «apertura» de tal ventana, o lo que es lo mismo a variar la radiación térmica capaz de escapar al espacio; lo que, indudablemente, implica un efecto térmico sobre la estratosfera.

Puesto que hemos visto en primer lugar la polifacética importancia de la ozonosfera, y hemos justificado, luego, la posibilidad de que sus alteraciones pueden dar lugar a cambios climáticos, pasemos a concretar de que forma las actividades humanas, son capaces de introducir tales alteraciones en la estratosfera y sus posibles consecuencias.

La cuestión se planteó en la década de los años 70, con motivo del comienzo de los vuelos SST (supersónicos-estratosféricos) que iban a tener lugar en plena estratosfera, ya que se temió que las fuertes emisiones de los reactores pudieran afectar a la distribución vertical del ozono, alterando, además, el normal equilibrio fotoquímico de producción-destrucción; ello hizo que cundiera la alarma, ya que no en vano el ozono es, a la vez, tamiz y escudo protector, frente a las radiaciones U. V.

Recordemos que la estratosfera está caracterizada por una estratificación vertical de gran estabilidad, con una inversión térmica, permanente, en su parte inferior; en ella los vientos predominantes son zonales, con pequeñas y transitorias circulaciones meridianas; por tanto, es lógico que cualquier sustancia, inyectada en ella, se extien-

da primero a lo largo de una estrecha franja zonal, dirigida según los paralelos, y luego se expansione de norte a sur, por todo el hemisferio en que fue inyectada ; finalmente, tras varios meses, o años, el lentísimo intercambio vertical, desplazará parte del agente extraño, hacia abajo, hasta la troposfera, donde ya podrá ser rápidamente dispersado por la turbulencia y, eventualmente, eliminado de la atmósfera por la lluvia.

La estratosfera es pues una región de «estancamiento» susceptible de acumular y almacenar la contaminación, ya que sus tiempos de relajación, para sustancias inertes, vienen a ser del orden de los dos años ; esta prolongada permanencia de los agentes contaminantes, es la que hace temer pueda constituir un grave problema, y lo que es peor, de carácter internacional, pues los efectos debidos a las emisiones inertes de un país, han de afectar, por igual, al resto del hemisferio.

Todo ello motivó una declaración oficial de la OMM, que en su informe llegó, en enero de 1977, a sorprendentes conclusiones, y cuyos extremos más importantes fueron los siguientes (25) : La cantidad de ozono en la estratosfera viene determinada no tan solo por las reacciones fotoquímicas, entre átomos y moléculas de oxígeno, sino también por otras reacciones, en las que intervienen trazas de otros gases, tales como cloro y óxidos de nitrógeno ; la concentración de tales gases en la atmósfera está afectada por diversas actividades y, especialmente, por los vuelos a gran altura, el uso y abuso de los freones, en sprays y refrigeradores, así como el de fertilizantes ; también se cita, pero es ajeno a nuestro propósito, el efecto de las erupciones volcánicas. Cada una de estas posibilidades fue examinada, por varios comités de expertos, por encargo de la OMM y en su informe se llega a las siguientes conclusiones (26) :

1. Los vuelos a baja altura, unos 17 km, y con la intensidad normal actual, no parece puedan determinar cambios en el ozono, detectables sobre el fondo de sus propias oscilaciones naturales.

2. Las grandes flotas SST, volando a mayores alturas, pueden determinar alteraciones significativas, por lo que se impone un acuerdo internacional, tanto acerca de las frecuencias de vuelo, como del nivel de emisiones.

3. Aunque no parece que las nuevas modalidades agrícolas puedan producir cambios significativos en la ozonosfera, el problema merece se le dediquen estudios continuos y más detallados.

4. La evidencia actual apunta hacia el riesgo que representa el hecho de que siga, al ritmo presente, la emisión de freones, en la atmósfera, pues los efectos, a largo plazo, de una emisión continuada como la que se registra desde los primeros años de la década de los años 70, puede dar lugar a una destrucción del 12 % de la concentración normal del ozono, para fines del presente siglo; lo que traducido en términos de la intensidad de la radiación ultravioleta con efectos biológicos (U.V-B) capaz de llegar hasta el suelo, puede representar un incremento del 24 %.

A efectos de los posibles cambios climatológicos, el informe dice que una reducción del 10 % del ozono estratosférico, traería consigo un enfriamiento de unos 10°, en la estratosfera superior. Ahora bien, dada la complejidad de las interacciones estratosfera-troposfera-suelo, no cabe deducir fácilmente, ni con cierto grado de confianza, lo que tales cambios vendrían a representar para el clima terrestre.

Esta dificultad se debe a que carecemos de un modelo tridimensional satisfactorio, aunque tenemos entendido que la OMM, conjuntamente con la UNEP (United Nat. Envir. Programme) (27) están abordando el problema; de momento casi todos los que se han manejado son monodimensionales, es decir aplicables a una atmósfera asimilable a una simple columna vertical, y en los que se admite que la radiación solar neta, en la parte superior de la atmósfera, viene equilibrada por la radiación I. R. emitida por el sistema superficie terrestre-atmósfera, de modo que el flujo total sea nulo.

Todos estos modelos unidimensionales, desde el clásico de Manabe y Wetherald (28), hasta el más reciente de Felds (29), llegan a la conclusión de que la destrucción del 10 % de ozono, determinaría un enfriamiento, junto al suelo, entre 0,1° y 0,3° C; este hecho, por sí solo, podría desencadenar un cambio climático, pero no obstante hay que hacer constar que el propio impacto biológico que ocasionaría tal reducción del ozono, quitaría toda importancia al posible enfriamiento subsiguiente.

Por otra parte, está claro que la temperatura del suelo es sensible a la forma de la curva que da la variación de la concentración de ozono, con la altura: la superficie terrestre se enfría apreciablemente con la cota a la que se sitúa el máximo de dicha distribución vertical, de modo que, según cálculos de Ramanatham (30), la temperatura superficial media pasa de 288,66 K a 287,56 K, cuando la altura del máximo lo hace de 18 a 26 km. A pesar de que tales variaciones tér-

micas pueden parecer insignificantes, hay que recordar que el equilibrio atmosférico es metaestable y que, en virtud de los mecanismos de retroalimentación, fueron alteraciones térmicas del orden de  $\pm 1$  K, las que en el pasado dieron lugar a los períodos de avance y retroceso de las masas de hielo, ligadas a los períodos glaciares.

La superficie terrestre se enfría claramente, cuando aumenta la altura correspondiente al máximo del ozono, porque la banda de absorción de este gas, a 9,6 micras, se hace menos intensa con la altura, en virtud de los efectos de ensanchamiento de aquella banda con la presión, y por tanto, se enfría la estratosfera; este enfriamiento implica una disminución de la radiación infrarroja emitida hacia abajo y, en consecuencia, el enfriamiento superficial.

Además la distribución vertical del ozono, así como la cantidad global, dependen estrechamente de la latitud y estación del año, por lo que los efectos de las variaciones de la distribución de ozono, deben analizarse con modelos, por lo menos, de dos, o tres dimensiones; como primer paso en tal sentido, varios investigadores han intentado estimar el efecto de la distribución actual sobre el balance energético latitudinal entre troposfera y superficie terrestre (31), poniéndose de manifiesto un claro calentamiento debido a la transferencia de energía hacia la troposfera, a través de la banda 9,6 micras del ozono, durante la primavera y verano, para latitudes superiores a los 40 ó 45°.

Hasta aquí hemos examinado los efectos climáticos del ozono, por su acción radiativa, pero existen otros efectos potenciales indirectos en virtud de su decisiva influencia en la circulación estratosférica y en los mecanismos de acoplamiento dinámico con la troposfera (32) (33).

Otros posibles efectos climáticos del ozono han sido sugeridos (34) en relación a su influencia sobre la concentración del vapor de agua en la estratosfera: La razón de mezcla del agua en la misma varía con la temperatura de la tropopausa tropical (35); si este hecho resulta de validez general, la razón de mezcla en la estratosfera disminuiría también al hacerlo la temperatura de la tropopausa; en consecuencia, la disminución de la razón de mezcla del agua, determinaría otra de su propia emisión infrarroja, lo que tendería a producir un enfriamiento, tanto troposférico, como de la superficie terrestre.

Antes de seguir, quisiera insistir un poco más acerca de la acción

depredadora que sobre el ozono estratosférico ejercen los residuos gaseosos, y entre ellos, y muy especialmente, los óxidos de nitrógeno; para ello voy a referirme a una experiencia que a mi juicio es definitiva y no demasiado conocida; sabido es que los protones de alta energía (1 GeV), asociados a las fulguraciones y protuberancias solares, ocasionalmente, llegan a la atmósfera, procedentes del sol; tales protones son capaces de producir óxido nítrico, mediante la previa ionización del nitrógeno, por medio de los electrones secundarios originados por dichos protones energéticos. Recuérdese que si bien lo que denominamos constante solar global (24), puede considerarse constante, por lo menos dentro de un margen del  $\pm 1\%$ , en cambio, tanto su componente U. V., como los rayos X, y muy especialmente la componente corpuscular, aunque proporcionalmente, frente a la global, sean insignificantes, pueden experimentar bruscas variaciones bastante importantes.

Los depredadores del ozono y sus efectos.

Pues bien, el proceso de emisión corpuscular, en forma de protones de alta energía, más importante que ha sido registrado, en condiciones aptas para el estudio de su correlación con el ozono, en los últimos años (26), tuvo lugar el 4 de agosto de 1972, en la zona polar; coincidiendo con tal suceso, un dispositivo B. U. V., monitor de ozono por medio de radiación U. V. retrodifundida, instalado en el satélite Nimbus 4, registró una notable consecuencia: la cantidad total de ozono, por encima del nivel de los 4 mb., o cota de unos 40 km., sufrió una brusca y notable disminución, del orden del 15%; como tal variación no representa, sin embargo, más allá del 1%, del ozono global existente en una columna vertical de 40 km., no es de extrañar que no fuera registrada en las medidas de concentración global que se llevaban a cabo, desde el suelo, en las mismas latitudes polares (estación de Resolute). Sin embargo, tal experiencia proporcionó una clara evidencia de la reducción del ozono, por el óxido nítrico, en la estratosfera, a la vez que puso de manifiesto la necesidad de controlar aquellos mecanismos o procesos que puedan determinar una acumulación de tales óxidos, o de otros agentes depredadores del ozono, en dicha parte de la atmósfera donde, precisamente, la ozonósfera tiene su centro de masa. Téngase en cuenta que en la reacción que se produce entre el ozono y el óxido nítrico, este último es un mero catalizador (36) que pasa a dióxido y luego a óxido nítrico otra vez, al unirse al oxígeno atómico; de modo que pequeñísimas cantidades de tal óxido pueden destruir gran-

des cantidades de ozono y seguir haciéndolo, hasta que tal óxido nítrico, o su ácido, sea apartado físicamente de la estratosfera, por un proceso lento y natural, para ser transportado hacia la troposfera, de donde puede ser eliminado por la precipitación.

Por tanto, si la estratosfera está sometida a contaminación por parte de sustancias capaces de destruir catalíticamente el ozono, puede ocurrir una importante eliminación de tal gas a escala global. Por ejemplo, según datos de Grobeker (37), si la flota de aviones SST de un país estuviera constituida por 500 reactores de tal tipo y éstos cruzaran de 7 a 8 horas por día la estratosfera, lanzando 18 gramos de óxido nítrico por kilo de combustible consumido, en tal caso unos  $10^{12}$  gramos de moléculas de  $\text{NO}_x$  por año serían introducidas en la atmósfera, y la reducción global, promedia, del ozono se estima sería alrededor del 15 %, en todo el hemisferio en que se produjeran los vuelos.

Y por desgracia el óxido nítrico no es el único contaminante capaz de destruir catalíticamente el ozono, pues la relación de posibles agentes contiene, por lo menos, otros cinco productos, bien conocidos, entre los que cabe destacar los freones.

La reducción del ozono estratosférico, en virtud de la concentración de freones en la estratosfera, ha sido evaluada (38) a partir del supuesto de que la utilización de tales freones continuará, al ritmo actual; los resultados obtenidos hacen pensar que, de confirmarse las estimaciones de los modelos utilizados, el uso de dichos productos tendrá que experimentar una drástica limitación, impuesta por acuerdos internacionales.

Por si todo esto fuera poco, Ruderman (39) nos amenaza con la posibilidad de que la explosión de alguna supernova próxima (dentro de una distancia de 50 años luz), puede ser capaz de destruir todo el escudo protector de ozono, bajo un gigantesco proceso análogo al que hemos mencionado, en el caso de los protones solares; menos mal que, a continuación, el autor nos tranquiliza afirmando que tal suceso cabe esperarlo cada unos pocos centenares de millones de años.

Entretanto hemos de preocuparnos tan solo de los depredadores de origen antropogénico, pero incluso en relación a ellos hay que pensar que la naturaleza es bastante más sabia que los hombres y en todos estos cálculos y modelos, en los que se basan las previsiones, elaborados con todas las naturales imprecisiones humanas, se

ignora con harta frecuencia la enorme capacidad de auto-recuperación de la propia naturaleza, a través, quizá, de sencillos procesos que desconocemos, cual pudiera ser, por ejemplo, la existencia de mecanismos de autocorrección, o simas ignoradas, con los que la Sabiduría del Creador, previendo la insensatez humana, pudo haber enriquecido a la naturaleza; que a fin de cuentas viene a ser lo que con gran generalidad, dijo Sir John Mason (40) «la atmósfera es un sistema muy robusto y con una innata capacidad para compensar y contrarrestar cualquier perturbación».

Hasta aquí, hemos considerado los efectos contaminantes, en la estratosfera, tan solo en su acción depredadora del ozono, con la consiguiente alteración del equilibrio radiativo en dicha parte de la atmósfera; pero hay otras acciones en virtud de las cuales, minúsculas cantidades de diversos gases extraños, tales como los ya mencionados freones, óxidos de nitrógeno, metano, amoniaco, sulfuroso, etc., pueden perturbar directamente el citado equilibrio, aún en el supuesto, muy discutible, de que no afectaran al propio ozono; ello se debe a que todos los gases citados (41) poseen bandas de absorción en el intervalo de 8 a 14 micras que, recordémoslo, constituye lo que hemos denominado la «ventana de la atmósfera»; de modo que, si en virtud de tales gases, dicha ventana se hiciera más estrecha, el efecto invernadero de la atmósfera se alteraría y con ello también el equilibrio radiativo que determina la distribución de temperaturas en la estratosfera. Se trata de un proceso análogo en virtud del cual la concentración creciente del anhídrido carbónico, en la troposfera, viene determinando alteraciones térmicas, en sentido de un claro calentamiento neto (42), o del que hizo inhabitable la atmósfera, demasiado caliente, del planeta Venus.

Por lo que a los freones se refiere, que parece son los contaminantes más peligrosos, ha quedado demostrado (43) que aún en el caso de que su acción depredadora no fuera importante, frente a la capacidad de recuperación de la propia atmósfera, debería tenerse en cuenta su papel en el balance radiativo. Supuesta una concentración actual de tales freones en la atmósfera, del orden de  $10^{-4}$  ppm, y dado que su vida media en ella se calcula (44) en unos 45 a 68 años, no resulta arriesgado suponer que antes del año 2000 llegue a hacerse de 4 a 5 veces mayor, en cuyo caso su efecto invernadero aislado vendría a representar un calentamiento atmosférico del orden de los  $0,2^{\circ}$  C. Si a este dato se agrega el posible efecto de



calentamiento de los otros gases tracer citados, y que las actividades humanas van haciendo que se acumulen en la estratosfera, parece que su efecto invernadero puede llegar a ser de 0,2 a 0,6° C, para concentraciones dobles de las actuales; resulta pues que es casi evidente que el efecto global del calentamiento superficial terrestre, de todos estos vestigios gaseosos, por efecto invernadero, puede acercarse a 1° C, para fines de siglo.

Por lo que al ozono concierne, parece ser que una disminución del 25 %, en el espesor normal de la ozonosfera, que es de unos 0,34 cm., determinaría, por efecto invernadero, un descenso en la temperatura terrestre superficial entre los 0,3 y 0,5° C, lo que, en parte, compensaría el efecto opuesto determinado por el resto de los gases mencionados (45).

Tal vez estos datos parezcan poco elocuentes, sino insistimos en que todos los pasados cambios climáticos, épocas glaciares y de desglaciación, fueron determinadas por alteraciones térmicas del mismo orden de magnitud, o incluso menores, y que, desde luego, un simple cambio en la temperatura superficial de  $\pm 0,5^\circ$  %, puede ser suficiente para alterar algunas variables climáticas importantes (46), como la lluvia, la extensión de la capa de hielo y el nivel de los mares que, por una especie de retroalimentación, tan estrechamente está ligado a los hielos árticos. De ahí la extraordinaria importancia de que las abundancias de todos los gases tracer atmosféricos, y sus tendencias, sean cuidadosamente controladas, bajo normas de carácter internacional, pues en la estratosfera no existen regiones, ni fronteras... ¡Tal vez sea conveniente recordarlo en tiempos en que nacen las micronacionalidades!

Y para terminar quisiera referirme a otra faceta del ozono que, posiblemente, dentro de pocos años reclamará la atención general, en esta constante preocupación que, desde hace tiempo, hay que prestar al tema de las atmósferas urbanas. Para ello, permitidme que sin abandonar la ozonosfera, que como es sabido se extiende desde el suelo, hasta los 40-60 km., descendamos de la estratosfera, donde viene ocurriendo todo lo que hemos estado examinando, en relación al ozono, hasta las capas inferiores de la troposfera, la capa planetaria superficial, en la que se desenvuelve nuestra existencia y todas las actividades humanas y donde, parece ser, que también el ozono está reclamando nuestra atención.

En efecto, dicho gas fue identificado por primera vez, como

Smog fotoquímico; experiencias.

contaminante principal de la atmósfera de Los Angeles, en California (47), en la década de los años 50, formando parte del fenómeno que se denominó «smog fotoquímico», para diferenciarlo del clásico smog británico, cuyas características son totalmente distintas (48), tanto por su origen como por los mecanismos de formación, época del año en que se presenta, carácter oxidante del primero, frente al fuertemente reductor del segundo, etc.; sólo tienen en común el tipo general de agresión biológica a que dan lugar.

Este tipo de niebla, extraordinariamente oxidante, se forma en condiciones meteorológicas de fuerte insolación, escaso viento y existencia de una acusada inversión térmica junto al suelo y reforzada por otra, más alta, de subsidencia; en resumen, para que se produzca son indispensables la intensa radiación solar y el estancamiento del aire. El proceso de formación, aunque es muy complejo, tiene por base la fotólisis de los óxidos de nitrógeno, bajo la acción de la radiación solar, de  $\lambda < 430$  nm., en presencia de hidrocarburos y otros «precursores», procedentes de los tubos de escape de los motores de explosión, que promueven la reducción del dióxido de nitrógeno a óxido nítrico, con formación de ozono (49); el término «precursores» del ozono, se aplica a la descripción de todas aquellas sustancias que, bajo la acción de la radiación solar, contribuyen a la formación del ozono.

Puesto que en Madrid se dan, con frecuencia, condiciones meteorológicas favorables a la aparición del smog fotoquímico, comenzamos hace unos cinco años las observaciones relativas a las concentraciones de ozono, junto al suelo, mediante un monitor Bendix (50); las medidas pusieron muy pronto de manifiesto la existencia de un acusado máximo de la concentración de dicho gas, entre las 13 h. y las 16 h., lo que resulta lógico dada su estrecha vinculación a la radiación solar (51); por otra parte, tales máximos eran mucho más notables durante los meses de verano, en los que, en algún caso, se alcanzaron concentraciones que llegaron a sobrepasar, si bien ligeramente, los valores standard, o umbral de peligrosidad para dicho gas.

Al confirmarse nuestra sospecha de que la atmósfera urbana de Madrid podría ser propicia a la formación fotoquímica de ozono, pensamos que los altos valores registrados, en la Ciudad Universitaria, debían ser superados en el centro urbano, donde, en virtud de la intensa circulación de vehículos a motor, la abundancia de «pre-

cursores» debería ser mucho mayor. Pero, con gran sorpresa por nuestra parte, medidas llevadas a cabo alternativamente, en la Ciudad Universitaria y en la vaguada de Cibeles, pusieron de manifiesto todo lo contrario, pues en el segundo de los lugares citados, las concentraciones alcanzadas por el ozono eran, siempre, notablemente inferiores (52).

Con objeto de comprobar que a pesar del resultado negativo anterior, debían existir «precursores» en la atmósfera urbana, planteamos la siguiente experiencia: Construimos una caja de Mylar, material plástico inerte al ozono (53) que permite el paso de la radiación solar a partir de  $\lambda > 320$  nm., cuyo volumen era alrededor de un metro cúbico, y hasta cuyo interior podían penetrar las radiaciones responsables de los fenómenos fotoquímicos implicados, pues sus longitudes de onda se encuentran dentro del límite fijado por la transparencia del Mylar. La caja contenía aire urbano, normalmente contaminado, y al exponerla a la radiación solar, durante las horas del mediodía, las concentraciones de ozono del aire interior fueron aumentando constantemente, a lo largo de las medidas que se hicieron, entre las 10 h. y las 16 h.; esto demostraba indudablemente la formación de ozono en el interior del recinto, y la presencia de precursores en el aire urbano que contenía. Alternando con las medidas de las concentraciones del aire interior, se realizaban también otras correspondientes al aire urbano exterior, comprobándose que estas últimas eran notablemente más bajas a lo largo de toda la experiencia, ya que la presencia renovada de sustancias reductoras puede impedir el normal crecimiento fotoquímico del ozono. La síntesis del ozono debe producirse, por igual, en el interior y fuera de la caja, pero al no renovarse, en el primer caso, la cantidad de reductores, la concentración de ozono en el aire interior llegaba a hacerse casi el triple de la correspondiente al aire urbano exterior.

La misma experiencia realizada a unos 100 km. de Madrid, en plena sierra, confirmó la ausencia de precursores en el aire del lugar, al no registrarse la fotosíntesis del ozono en el aire interior de la caja, donde la concentración de ozono medida se mantenía constante e inferior a la que daba el aire libre exterior (52), en el que iba experimentándose el normal aumento diurno, bajo el efecto de la radiación solar y en ausencia de los posibles agentes urbanos reductores (54).

Con ello quedó justificada la aparente anomalía que veníamos re-

gistrando: la contaminación por ozono que durante los días de fuerte insolación es bastante acusada en la periferia urbana resulta bastante menor, y de hecho casi nula, en el centro urbano, donde indudablemente existen «precursores», pero también «depredadores», en forma de contaminación fuertemente reductora (monóxido de carbono, partículas materiales, humos, etc.), capaces de eliminar el ozono que pueda originarse, en virtud del citado proceso de fotólisis.

Esto ha quedado confirmado, además, al representar la evolución horaria, diaria, de las concentraciones de monóxido de carbono, partículas materiales en suspensión en el aire y ozono, en la atmósfera de Madrid (51): Las variaciones correspondientes al ozono son totalmente antagónicas a las de los otros dos que, por otra parte, son muy análogas entre sí: los máximos de ozono se registran en coincidencia con los mínimos de los otros dos y viceversa.

Hemos insistido en estos resultados, pues a nuestro juicio pueden ser muy significativos de cara al futuro, al poner de manifiesto que al tratar de obtener una mejor calidad ambiental urbana, tal vez, rebajados los niveles correspondientes a las sustancias reductoras, surja la urgente necesidad de controlar la presencia de «precursores» capaces de determinar altos niveles de ozono, así como de otras sustancias de carácter oxidante, y la formación del smog fotoquímico, para lo cual se dan en nuestra atmósfera urbana, en muchos casos, todos los ingredientes precisos: fuerte insolación, estancamiento e intensa circulación de vehículos a motor, con deficiente combustión.

Después de pasar revista a todas las implicaciones climáticas de la ozonósfera, pues también la aparición del smog fotoquímico representaría un factor climático, creemos haber justificado lo que decíamos al principio, acerca de la permanente y polifacética actualidad del ozono atmosférico; pero cabe preguntarse, aparte de este último hecho, qué conclusiones pueden deducirse de todas las consideraciones expuestas; quizá la primera, y más clara, sea subrayar la fragmentaria e incompleta naturaleza de nuestros conocimientos y la enorme dificultad de asignar efectos específicos a causas concretas, principalmente debido a que siempre nos movemos en áreas interdisciplinarias, en las que el avance de nuestros conocimientos es demasiado lento, las investigaciones poco brillantes, las controversias inacabables, muchas las interferencias y demasiadas las implicaciones no científicas.

Conclusión.

En base a modelos físico-matemáticos, puede parecer relativamente sencillo afirmar que si tal y cual factor «pudiera» aislarse del resto, el resultado sería éste o aquél..., pero en la naturaleza, como en la vida real, ningún factor puede aislarse del resto, ni la atmósfera puede encerrarse entre las cuatro paredes de un laboratorio, para someterla a experimentación, de modo que las respuestas a ciertos interrogantes, o las pruebas de ciertas teorías e hipótesis, sólo podrían llegar después que la propia atmósfera «haya llevado a cabo su experimento», y no creo que nadie pueda ser partidario de dejar que tal cosa ocurra, pues de producirse los cambios, en cierto sentido no deseables, serían de índole irreversible y consecuencias poco gratas, o tal vez nefastas.

Ante tal situación, existe la postura dramática, casi apocalíptica, de los que a falta de certeza tienden a suponer lo peor y propugnan, frente al año 2000, una especie de «estrategia del Génesis» (55), consistente en mantener amplios márgenes de seguridad (como las del prudente Faraón ante las profecías de José, o las del propio Noé, ante órdenes Divinas), que sean capaces de garantizar nuestra capacidad de reacción, y medios de supervivencia, aplicables ante cualquier problema urgente.

En oposición a tal postura, hemos de registrar la de los escépticos, o tal vez optimistas a ultranza (56), que opinan que la tecnología, causa de tantos desajustes, será también capaz de encontrar, en el momento oportuno, soluciones para sus consecuencias, caso de que llegaran a producirse, pues a su juicio, al incluir más y más sustancias y reacciones y hacerse por lo tanto más compleja la estructura y la composición de la estratosfera, algunas teorías parecen predecir efectos menores, para una concentración dada de un determinado contaminante; éste, a fin de cuentas, podría no ser más que un aspecto parcial de un principio, bastante general en la naturaleza, según el cual un sistema complejo en el que existen numerosos mecanismos de retroalimentación, resulta menos susceptible a los cambios determinados por agentes o influencias exteriores; de modo que bien pudiera ocurrir que, a medida que vayamos conociendo más acerca de la estratosfera y su composición, podamos esperar que los efectos de la polución sean inferiores a los previstos... A fin de cuentas, ya dijo alguien que «el mundo subsiste sobre sus propios absurdos e incongruencias y nuestros desafueros».

Es evidente y comprensible, la humana tendencia a exagerar y

supervalorar el propio juicio, en el calor del debate, pero los que reaccionan ante las profecías fatalistas arguyendo que carecen de suficiente base científica, tienden a convertirse, a su vez, en profetas de paraísos imposibles o utópicas bienaventuranzas tecnológicas, que no dejan de ser menos irracionales, a pesar de su supuesta etiqueta racionalista, al profesar una especie de fe en el propio instinto humano de supervivencia, o en cierta mágica panacea tecnológica de menor base científica de la que echan de menos en sus oponentes.

Lo que se espera de los hombres de ciencia no son profecías, y mucho menos utopías, sino datos y hechos concretos que, además, sean presentados con moderación, pero con claridad, y que, en lo posible, no pongan de manifiesto discrepancias internas que puedan ser explotadas por intereses partidistas contrapuestos, pero que permitan establecer una serie de advertencias efectivas, sustitutivas del propio instinto de animales que aciertan a emprender el vuelo antes de que llegue el huracán, almacenan grandes despensas ante un crudo invierno, o adaptan sus pieles y plumajes de acuerdo con los cambios que se avecinan.

Por esta razón, entre ambas posturas, creemos que cabe adoptar una intermedia que implica una serena, pero constante, vigilancia de las perturbaciones creadas en la atmósfera, mediante una investigación interdisciplinar, en la que cada faceta sea considerada como parte de un complejo sistema climático, y no con el protagonismo en el que posiblemente hayamos incurrido al asignarle al ozono tan importante papel; sobre esta urgente necesidad de colaboración, no tan solo interdisciplinar, sino también plurisectorial, hemos insistido en todas las ocasiones, oportunas e inoportunas, en que nos ha sido posible plantear la cuestión (57), para que podamos profundizar sobre problemas concretos y contribuir al desarrollo de una política coherente y operativa, en el campo de las ciencias ambientales. Tal vez esta tribuna, y vuestro apoyo, presten ahora a mis palabras la resonancia de que otras veces carecieron.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) BALTÁ, J. y CATALÁ, J.: *El problema de la Ozonosfera*. Publicaciones del Instituto Nac. Geofísica (1944).
- (2) CATALÁ, J. y CALVO, F.: *Symposium sur l'ozone Atmospherique*. Mónaco, Proceedings, pág. 39 (1968).
- (3) CATALÁ, J.: *Pasado, presente y futuro de la Ozonosfera*. UNED, Grabación en Prensa.
- (4) BOVILE, B.: *The World Climate Program*. Conf. Intern. «Climate and Offshore Energy Resources», Londres, octubre (1980).
- (5) FEAGLE, R. G.: *Water, Air and Soil Pollution*. 12, núm. 1, 9 (1979).
- (6) *The Global 2000 Report to the President of U. S.* «Entering the 21 st. Century», vol. 2, Apéndice, Tech. Rep., Pergamon Press, New York (1980).
- (7) RAMAGE, C. S.: «Bull. Amer. Meteo. Soc.», 57, 4 (1976).
- (8) WIIN-NIELSEN, A.: *Principles of Climate Modelling*. Conf. Intern. «Climate and Offshore Energy Resources», Londres, octubre (1980).
- (9) LANDSBERG, H.: *Inadvertent Atmospheric Modification Through Urbanization*. Weather and Climate Modification, edit. W. N. Hess, Wiley, New York, pág. 726-763 (1974).
- (10) CASTRO, M. et al.: *Estudio comparativo entre una serie de sondeos termodinámicos simultáneos*. Comunicación presentada en la XVIII Reunión Bienal de la Real Soc. Esp. de F. y Q., núm. 10, 17, Burgos, octubre (1980).
- (11) BRODERIC, A.: *The Atmosphere Endangered and Endagering*. Castle House, Pub. Ltd., pág. 13 (1980).
- (12) CATALÁ, J. et al.: VIII<sup>ème</sup> Conference Inter. sur la Physique des Nauges, Proceedings, Vol. II, pág. 597, Clermont-Ferrand, julio (1980).
- (13) DETTWILLER, J.: O. M. M., Nota técnica núm. 108, pág. 361 (1970).
- (14) CATALÁ, J.: «Rev. Real Acad. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.», Madrid, tomo homenaje, pág. 133 (1975).
- (15) CATALÁ, J. et al.: *Incapacidad difusora de la atmósfera e índice global de contaminación atmosférica*. Comunicación presentada en la XVIII Reunión Bienal de la Real Soc. Esp. de F. y Q., 10-33, Burgos, octubre (1980).
- (16) SAWYER, F. G.: *Water, Air and Soil Pollution*. 12, núm. 1, 38 (1979).
- (17) *Global Ozone Research and Monitoring Project*. O. M. M., Reunión 15 mayo, Ginebra (1977).
- (18) MANABE, S. y STRICKER, R.: «Jour. Atmospheric Scien.», 21, núm. 4, 361 (1964).

- (19) MANABE, S. y HUNT, B. G.: «Mounth. Weather Rev.», núm. 8, 447 (1968).
- (20) KIRGIAN, A. KH.: *The Physics of Atmos. Ozone*. Pág. 275, Israel Prog. Trans. (1975).
- (21) KIRGIAN, A. KH.: *The Physics of Atmos. Ozone*. Pág. 227, Israel Prog. Trans. (1975).
- (22) GARP-JOC: «Climate Modelling», GARP Pub. Ser., núm. 16 (1975).
- (23) KELLOG, W.: O. M. M., Nota téc. núm. 156 (1977).
- (24) DOMINGO, V.: *Solar Rad. and Climate*. «Atmosph. Physics from Spacelab», J. J. Burger, edit., pág. 21 (1976).
- (25) *News. Weather*, 31, núm. 4, 135 (1976).
- (26) U. N. E. P.: *Atmospheric Ozone*. OMM-UNEP WG 7/5 (1977).
- (27) OMM-UNEP: *Report on Ozone Modelling*. Ginebra (1977).
- (28) MANABE, S. y WETHERALD, R. T.: «*Jour. Atmos. Sci.*», 33, 2185 (1976).
- (29) FELS, S.: «*Nat. Acade. of Sciences*». An Interim Rep. on Ozone Protection (1977).
- (30) RAMANATHAN, V.: «*Jour. Atmo. Sciences*», 33, 1092 (1976).
- (31) RAMANATHAN, V. y DICKINSON, R. E.: «*Nat. Acad. of Sciences*». An Interim Rep. on Ozone Protection, pág. 39 (1977).
- (32) DICKINSON, R. E.: «*Can. Jour. Chem.*», 52, 1616 (1974).
- (33) BATES, J. R.: «*Quat. Jour. Roy. Meteo. Soc.*», 103, 397 (1977).
- (34) RAMANATHAN, V.: «*Jour. Atmo. Sciences*», 33, 1092 (1976).
- (35) MARTENBROOK, H. J.: «*Jour. Atmos. Sciences*», 28, 1485 (1971).
- (36) CRUTZEN, P. J.: «*Roy. Meteo. Soc. Quart. Jou.*», 96, 320 (1970).
- (37) GROBECKER, A. J.: Rep. núm. Dot-TST, 75-50, U. S. Dep. Trans., Washington D. C. (1974).
- (38) LOGAN, J. A. et al.: «*Trans. Roy. Soc.*», 290, 187 (1979).
- (39) RUDERMAN, M. A.: «*Science*», 184, 1074 (1974).
- (40) MASON, J.: «*Jour. Roy. Meteo. Soc.*», 102, 473 (1976).
- (41) KONDRATIEV, K. YA.: «*Weather*», 55, núm. 9, 252 (1980).
- (42) WETHERALD, R. T. y MANABE, S.: *Man's Impact on Climate*. Pág. 57, Elsevier Sci. Pub. Co. (1979).
- (43) RAMANATHAN, V.: «*Science*», 190, núm. 4266, 190 (1975).
- (44) BRYSON, R. A.: «*Science*», 184, 753 (1974).
- (45) BOLIN, B.: *Man's Impact on Climate*. Comunicación Conf. Inter. «Climate and Offshore Energy Resources», Londres, octubre (1980).
- (46) PERNER, D.: *Man's Impact on Climate*. Pág. 215, Elsevier Sci. Pub. Co. (1979).
- (47) HAAGEN, J. A. et al.: «*Ind. and Eng. Chemi.*», 44, 1342 (1952).
- (48) MCCORNIC, R. A.: *Meteo. Aspects of Air Pollution*. O. M. M., Nota téc. núm. 106, pág. 6 (1970).
- (49) PITTS, J. et al.: SAPRC Rep. núms. 76-01 (1976).
- (50) Environment Canada. Rep. 1-AP-73-7 (1973).



- (51) CATALÁ, J., ZURITA, E. et al. : *Air Quality Meteo. and Atmosph. Ozone*. ASTM STP a 63, pág. 555, «Note on Ozone, Carbon Monoxide and Particulate Matter Concentration» Boulder (Colorado), Edit. Morris, A. L. and Barra, R. C. (1978).
- (52) ZURITA, E. : Tesis doctoral, Uni. Complutense (1979).
- (53) ALDAZ, L. : «Jour. Geoph. Res.», 74, 6954 (1969).
- (54) VUKOVICH, F. M. et al. : «Atmospheric Environ.», 11, 967 (1977).
- (55) SCHNEIDER, S. H. : *The Genesis Strategy*. Plenum Press, New York, London (1976).
- (56) SCORER, R. S. : «Atmosph. Environ.», 11, 277 (1977).
- (57) CATALÁ, J. : «Rev. Univ. Complutense», XXV, núm. 105, 63 (1976).

**DISCURSO DE CONTESTACION**

**DEL**

**EXCMO. SR. D. JOSE GARCIA SANTESMASES**

Gran honor y satisfacción representan para mí dar la bienvenida a nuestro compañero, Profesor Joaquín Catalá de Alemany. Agradezco profundamente a la Academia este privilegio que me ha concedido, no solo por los grandes méritos que concurren en el nuevo Académico sino también por la amistad entrañable que nos une, forjada en nuestra juventud y afianzada en el transcurso del tiempo.

Este solemne acto me lleva con el vuelo de la imaginación a tiempos muy lejanos cuando Joaquín Catalá y yo éramos ayudantes de la Universidad de Barcelona. No habíamos sido compañeros de promoción estudiantil, pero sí lo fuimos en la docencia; bajo la paternal supervisión del Prof. Isidro Polit, que nos inició en los caminos de la enseñanza de la Física y bajo cuya mirada vigilante dimos nuestros primeros cursos Universitarios. Otro joven licenciado se unió pronto a nuestras tareas docentes y de laboratorio; era Químico con gran interés por la Física y que andando el tiempo sería Catedrático de Metalurgia de la Universidad Complutense de Madrid. Muchos de los que me escuchan le han conocido; me refiero a José Terraza. La muerte nos lo arrebató prematuramente, a todos los que le queríamos y le admirábamos, cuando aún tanto podía aportar a la Ciencia española.

Estoy seguro, Joaquín, que me agradecerás en estos momentos este recuerdo a nuestro común amigo muerto, asociado a una época importante de nuestra juventud y espero que la Academia sabrá apreciar esta alusión a un gran científico español desaparecido.

Si mi amistad con Catalá me impide hacer una alabanza cumplida de su persona, sí puedo señalar lo que ya entonces era evidente para todos los que le tratábamos, sus grandes cualidades de inteligencia, capacidad de trabajo y aptitudes investigadoras, al propio tiempo que un agudo sentido crítico; todo ello disimulado, en ocasiones, por un escepticismo matizado con fina ironía.

Juntos preparamos las asignaturas de Doctorado que entonces

tenían que aprobarse en la Universidad de Madrid y juntos decidimos hacer la tesis doctoral. Es entonces cuando se comienzan a bifurcar nuestros caminos científicos.

Catalá que siempre había tenido interés por la meteorología, hace oposiciones al Cuerpo de Ayudantes de Meteorología, en enero de 1940, obteniendo el número uno. Esto marcó su vocación. En 1942 hace nuevas oposiciones al Cuerpo Facultativo de Meteorólogos obteniendo también el número uno.

Sin embargo, ello no motivó que dejara otra de sus vocaciones: la enseñanza de la Física. Era ya entonces un gran profesor y sus explicaciones en clase tenían fama por su claridad y precisión.

Por aquella época se trasladó a Madrid donde trabajó en el Instituto de Física y Química, Sección de Óptica (Sección que más adelante se convertiría en el Instituto de Óptica Daza de Valdés). Allí realizó investigaciones sobre Óptica Interferencial para el análisis de las aberraciones de los Sistemas Ópticos. Estas investigaciones le conducirían a la tesis doctoral que obtuvo con la calificación de sobresaliente y premio extraordinario. Más adelante amplió sus estudios en este campo en el Instituto de Óptica de Berlín, bajo la dirección del Prof. Weidert y del Dr. Shippa.

En 1944 después de brillantes oposiciones ganó la Cátedra de Física Teórica y Experimental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valencia.

A partir de este momento su trayectoria científica ulterior viene condicionada por dos vertientes profesionales: por un lado su labor docente e investigadora en la Universidad, por otro su profesión de meteorólogo. Entre ambas ha sabido mantener un equilibrio, no siempre fácil. Su interés por los fenómenos físicos atmosféricos le llevó inicialmente al estudio del ozono atmosférico y a las partículas cósmicas, para estudiar después las partículas elementales y radiactividad ambiental. Siguiendo esta trayectoria científica llegó al estudio de los problemas del medio ambiente y sus condicionamientos meteorológicos y vuelve nuevamente, según nos ha explicado en el admirable discurso que acabamos de oír, al papel que juegan la estratosfera y ozonosfera en nuestro ambiente y en sus posibles e imprevisibles implicaciones climáticas.

Esta trayectoria científica esbozada tan escuetamente representa una labor de muchos años.

En 1949-1950 estuvo pensionado, por el C. S. I. C., en la Uni-

versidad de Bristol, donde estudió las técnicas fotonucleares que luego introdujo en España. Con el mismo objetivo trabajó en 1951 en el Centro de Física Nuclear de Bruselas. En el verano de 1952 estuvo en Aldermaston y la Junta de Energía Nuclear le pensionó para visitar los Centros de investigaciones Nucleares de Génova, Roma y Milán en mayo de 1952 y de París (Saclay en 1954).

Con objeto de sistematizar el uso de la técnica fotonuclear en España se crea en Valencia el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), Centro Coordinado del C. S. I. C., del cual se nombra Director a Catalá, que continuó en dicho cargo hasta su traslado como Catedrático de la Universidad de Madrid.

Mediante estas técnicas se lograron ciertos resultados interesantes que creo oportuno señalar:

a) La detección en Valencia de la radiactividad atmosférica inducida por los ensayos nucleares chinos y franceses, incluyendo la detección de una notable partícula caliente («hot particle»).

b) Permitted descubrir en el IFIC (1970), una partícula que resultó ser el raro isótopo del Helio, He-8. Por cierto que tal descubrimiento, un año más tarde de que fuera descrito por Catalá, la prensa española lo publicó como un descubrimiento ruso.

La técnica foto-nuclear introducida por Catalá, se cultiva hoy en diversas Universidades españolas, con colaboraciones extranjeras gracias a las relaciones personales del nuevo Académico con diversos grupos afines de otros países.

Pero estos trabajos y la Dirección de IFIC, no colman sus deseos investigadores, y así vuelve siempre a los problemas meteorológicos.

Entre las muchas contribuciones en este campo desearía mencionar algunas concretas, que al propio tiempo muestran su espíritu investigador y de iniciativa:

a) Realización de los primeros, y hasta el presente únicos en España, sondeos verticales de ozono, mediante globos-sonda entre el suelo y los 30 kms.

b) Primera denuncia numérica (1975), sin ambigüedades, de la elevada contaminación urbana que sufren nuestras ciudades, no mediante los clásicos e inexpressivos datos analíticos de miligramos por metro cúbico, sino por un índice que por aquel entonces acababa de ser introducido por el laboratorio de OAK Ridge.

c) Finalmente, en la Cátedra de Física del Aire de Madrid, que desde 1973 desempeña, se detecta la presencia de contaminación

de carácter oxidante en nuestra atmósfera, actuando de pionero ante el posible riesgo que en el futuro pudiera representar el smog fotoquímico en nuestras urbes.

Su gran labor investigadora se halla plasmada en más de 150 trabajos, de los cuales el 30 % corresponde aproximadamente a sus contribuciones a la Meteorología y el 70 % a los basados en la técnica foto-nuclear.

Esta ingente labor investigadora no le ha impedido desempeñar cargos de responsabilidad a donde ha sido llamado por sus grandes cualidades científicas y humanas; así podemos señalar que ha sido Decano, por elección, de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valencia; Presidente de la Sección de Valencia, de la Real Sociedad de Física y Química y Vocal de la Junta Central de la misma Sociedad: director durante 15 años del Observatorio Meteorológico de Levante; Consejero de número del C. S. I. C.; Consejero del Patronato del Instituto de Estudios Nucleares; Fundador y Director del Instituto de Física Corpuscular de Valencia, Centro coordinado con el C. S. I. C. hasta 1973; Subdirector general de Promoción de la Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia (1973); Miembro de la Comisión Rectora del Instituto Nacional de Ciencias del Medio Ambiente (I. N. C. M. A.) del C. S. I. C.; Vocal de la Comisión Nacional de Geofísica.

Como complemento a esta amplia y fecunda labor nacional, hay que señalar su labor internacional no menos importante, representando a España, bien en Congresos Científicos bien en Comisiones o Sociedades.

Así, participó en el Congreso de Radiación Cósmica, patrocinado por la UNESCO, en julio de 1963. Consejero Técnico de la ONU, 1955 Ginebra (Suiza); Delegado experto de la Conferencia Atómica de Ginebra (1958). Durante dos años (1958-60) fue designado Jefe de la Sección de Intercambio Científico de la Agencia Internacional de Energía Atómica, con sede en Viena, donde entre otras actividades organizó dos Seminarios Internacionales sobre Educación Nuclear, que tuvieron lugar en París (1959) y San Carlos de Bariloche (Argentina) (1961).

Fue el primer representante de España en la Sociedad de Física Europea, desde su creación hasta 1971. En el aspecto estrictamente meteorológico participó en la V Reunión de la Comisión de Ciencias Atmosféricas, en Washington, 1970 y representante del Servicio Me-

teorológico Nacional, en la Conferencia Internacional sobre Física de las Nubes (O. M. M., Londres 1972).

Estas actividades dieron a Catalá un merecido prestigio internacional a la par que nacional y le hicieron acreedor a merecidas distinciones y premios, de los que señalamos solamente algunos:

Premio Francisco Franco de Ciencias del C. S. I. C. (1966).

Primera Ayuda March a la Investigación sobre Física fotocorpuscular (1959).

Primera Medalla de Física concedida por la R. S. E. F. Q. (1958).

Premio Cerdá Reig de la Excma. Diputación Provincial de Valencia (1956).

Premio Castellarnau de esta Real Academia de Ciencias (1961).

Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Miembro Correspondiente de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.

La brillante carrera científica de nuestro nuevo compañero ha culminado en la formación de una gran escuela en el campo de la Física y de la Meteorología. Ha dirigido 35 tesis doctorales, muchas de ellas realizadas en el IFIC de Valencia y siete, a partir de 1973, tras su incorporación a la Cátedra de Física del Aire, de la Universidad de Madrid. De los doctores formados por Catalá, siete son actualmente Catedráticos de Universidad.

Catalá puede estar satisfecho de la escuela que ha creado y de la que son protagonistas el gran número de discípulos suyos y que siguen los caminos de investigación trazados por él, algunos de los cuales ostentan cargos importantes en la docencia y en la investigación. Estoy seguro de que en el fondo de su corazón son estos discípulos los que constituyen su único orgullo y satisfacción, como ocurre con todos los buenos maestros.

Joaquín Catalá en el brillante y profundo discurso que acabamos de oír nos ha explicado de forma clara y amena el problema del ozono atmosférico y las vicisitudes por las que ha pasado su estudio, al cual dedicó el nuevo Académico gran parte de su vida científica, de forma que según sus propias palabras «la historia del ozono, podría ser la pequeña historia de mi vida científica». Este discurrir sobre temas en los que ha investigado personalmente dar a sus palabras el matiz especial de lo que se ha vivido.

Por otro lado, a lo largo de su exposición ha insistido reitera-

damente, tanto en la dificultad de obtener modelos numéricos satisfactorios, como en la que presenta el tratamiento de la información en ellos contenida. Creo justificado el escepticismo y dudas de nuestro nuevo compañero sobre la realización de modelos fiables. Esta creencia me anima a hacer algunas reflexiones y exponer algunos comentarios, principalmente bajo el punto de vista informático, sobre estos modelos.

Hace ya un cuarto de siglo se iniciaron éstos para el estudio de la evolución del clima y las causas de sus variaciones. La aparición de las computadoras influyó, lo mismo que en otros campos de la ciencia, en las investigaciones meteorológicas, concretamente en la predicción del tiempo y en el estudio de la posible variación del clima. Evidentemente, la construcción de computadoras cada vez más rápidas, contribuyó, sin duda, a la investigación sobre estos modelos climáticos y sinópticos, ya que exigen el uso de técnicas matemáticas que permitan tratar sistemas complejos. Como ejemplo del uso de los métodos numéricos en las investigaciones meteorológicas hay que citar el desarrollo de una teoría sobre la circulación general y el clima, realizado hace algunos años.

Acaso sea importante señalar que el tiempo, tal como lo experimentamos, a 2 m. de la superficie de la Tierra, es el resultado de un proceso muy complejo, físico, químico y dinámico que tiene lugar en el 99,98 % de la atmósfera por encima de nosotros. Para estudiar racionalmente, tanto la evolución del tiempo sinóptico como la del clima, se necesita conocer el comportamiento de toda la atmósfera, al propio tiempo que la hidrosfera y criosfera.

Se puede calcular lo que tardará una determinada computadora, para realizar un determinado experimento con el modelo elegido. Basta medir la velocidad con que se procesa un conjunto típico de instrucciones, en el que se incluya el uso de memorias periféricas. Evidentemente el progreso de las computadoras ha permitido reducir el tiempo necesario para llevar a cabo un determinado modelo numérico. Si medimos la capacidad de la computadora por el número de millones de instrucciones por segundo que puede llevar a cabo (MIPS), se observa que el aumento de esta capacidad desde la primera época de la existencia de las computadoras electrónicas, hasta las actuales, es impresionante. Desde 1953 en que podemos considerar que comienza esta era, en que el orden de velocidad era de 0,01 MIPS (10.000 inst. por segundo) va aumentando, pasa por 0,12



MIPS en 1960, 1 MIPS en 1965, 10 MIPS en 1970 y actualmente unos 100 MIPS. La miniaturización de los componentes permitirá incrementar la velocidad operativa que en el límite se considera puede llegar a  $10^4$  MIPS. Con objeto de lograr una mayor capacidad, se utiliza el proceso de la información en paralelo, en lugar de emplear el proceso serie.

En la predicción del tiempo para 24 horas, se utilizan modelos que adaptados a la potencia de la computadora, no necesitan mucho más de una hora en hacer la predicción, aunque con máquinas menos rápidas puede durar 4 ó 5 horas.

En realidad la realización de modelos atmosféricos se halla en sus comienzos. Así, hasta ahora no existe un solo modelo que describa adecuadamente todos los componentes del sistema en cuestión y que proporcione el conjunto de propiedades estadísticas que permita la descripción del mismo, como salida del modelo. A pesar de ello, existen varios modelos que tratan de describir partes del sistema climático.

Hay que señalar aquí un problema que se presenta en el uso de las computadoras. La salida de los modelos debe ser tal que se obtengan directamente o indirectamente las propiedades del conjunto estadístico que define la situación atmosférica. Ahora bien, ello presenta una disyuntiva: si se desea un modelo lo más completo posible entonces el intervalo de tiempo que necesita la computadora para cumplir su misión, es demasiado grande y resulta prohibitivo. Por otro lado, si para evitar este inconveniente, se utiliza un modelo más sencillo entonces, naturalmente el tiempo de integración es menor, el tiempo del computador es razonable, pero en cambio, los resultados obtenidos no son del todo fiables, ya que para lograr la simplicidad en el modelo es necesario despreciar muchos procesos físicos así como parámetros meteorológicos.

El desafío del futuro será diseñar modelos que incorporen todos los componentes del sistema atmosférico, simulando todos los procesos físicos de importancia para la determinación de su evolución.

¿Se podrán conseguir estos modelos? Para analizar esta pregunta debemos considerar la información suministrada por los satélites meteorológicos, que aumenta sin cesar, tanto en calidad como en cantidad. Ello nos lleva a decir unas palabras sobre estos satélites y los datos que facilitan. En 1961, dos meteorólogos, V. A. Bugaev y H. Wexler propusieron la Vigilancia Meteorológica Mundial (V. M. M.)

partiendo fundamentalmente de la ayuda que prestarían los satélites. Esta propuesta constituyó la base de un informe elaborado por la OMM (Organización Meteorológica Mundial) en respuesta a un llamamiento hecho por las Naciones Unidas para que se utilizara el espacio ultraterrestre para fines pacíficos.

En su primera época la planificación de la VMM dio lugar a la creación de un sistema mundial de observación por satélite. Pero más adelante las funciones de los satélites se ampliaron a otras de mayor importancia. Nos referimos a su misión de captar y elaborar información y difundirla, como ayuda a los programas de la Organización Meteorológica Mundial.

Los satélites son necesarios no solamente para el buen funcionamiento de la VMM, sino también para la investigación Global de la Atmósfera, investigación y realización de modelos climáticos, Programa de Hidrología Operativa, Programa de desarrollo de Recursos Hídricos, etc.

La mayoría de los países miembros de la OMM utilizan las imágenes procedentes de los satélites para sus actividades. Se usan también los datos cuantitativos procedentes de los mismos, como, por ejemplo, viento en altitud, distribución vertical de la temperatura y temperatura de la superficie del mar, etc.

La creación del Sistema Mundial de Satélites ha sido debida, fundamentalmente, a las contribuciones de EE.UU y U. R. S. S., pero hay que tener presente también las aportaciones de otros países, incluyendo el Meteosat europeo.

Los satélites usados tienen, en general, órbitas casi circulares con altitudes que oscilan entre 500 kms. y 1.500 kms. de forma que sean suficientemente bajas para observar los detalles de las nubes, pero al propio tiempo suficientemente altos para que se tenga una visión amplia, para las fotografías. Entre los satélites americanos, el denominado Nimbus, tiene una inclinación de su órbita tal que el satélite pasa sobre la misma área de la tierra, en la misma hora del día, durante toda su vida, lo cual tiene la ventaja de que las fotografías tomadas de la atmósfera se refieren al mismo lugar y a la misma hora local.

Los progresos tecnológicos de los satélites meteorológicos permiten esperar que para la década 1980 se logren obtener los siguientes parámetros (algunos de ellos se logran ya ahora): a) Atmósfera (Temperatura media de las superficies isobáricas; contenido total del vapor

de agua y su distribución por capas ; contenido total del ozono y su distribución vertical ; características de los aerosoles ; velocidad y dirección del viento en la troposfera, etc.). b) Nubes (Distribución de las nubes y su estructura ; altura y temperatura de las cimas de las nubes ; fases en que se halla el agua, gotas, cristales de hielo o mezcla, de la capa superior de las nubes, etc.). c) Superficie del océano (Temperatura en su superficie, situación de las principales corrientes oceánicas superficiales, etc.). d) Superficie terrestre (Temperaturas de la superficie terrestre ; grado de humedad del suelo ; distribución de la capa de nieve, etc.).

En la utilización de los datos procedentes de los satélites se han logrado éxitos notables. Así, las fotografías de las nubes transmitidas por los satélites se usan por los servicios de predicción de muchos países. Mediante esta transmisión de imágenes se pueden determinar fácilmente la posición, fase de desarrollo, dirección y movimiento de los ciclones tropicales y extratropicales, así como la posición e intensidad de frentes sinópticos.

Vamos a señalar algunas de las características de los satélites Nimbus. Fueron iniciados por NASA en 1960 y lleva en el vehículo espacial un observatorio capaz de recoger amplia información meteorológica.

Fue el primer satélite programado para investigación atmosférica. El número y calidad de los sensores de que iban provistos los sucesivos vehículos espaciales, iban en aumento, incrementándose la sofisticación, complejidad, capacidad y rendimiento. Los primeros satélites contenían sensores de imagen. Naturalmente estos sensores en los espacios sin nubes podían utilizarse (y así se hizo) para el estudio de las ciencias de la Tierra.

Como nos ha dicho Catalá, la máxima concentración de ozono se halla a una altura de unos 25 kms., donde absorbe radiación ultravioleta. Esta energía que es aproximadamente el 4 % de la solar que llega de la atmósfera exterior, es el principal manantial de energía de la estratosfera. La distribución del ozono afecta a la estructura térmica y circulación de la alta atmósfera.

Existen sensores que se han proyectado para determinar la temperatura y concentración de los gases de la atmósfera en función de la altitud, es decir el perfil vertical de temperatura. Los datos de concentración de gases y de temperatura se pueden deducir de la energía electromagnética emitida por aquellos que lo hacen en una an-

chura de banda muy estrecha y que disminuye cuando lo hace la presión, es decir, cuando aumenta la altitud.

Los gases atmosféricos emiten energía pero también la absorben. La energía electromagnética que trata de escapar hacia el espacio debe atravesar la atmósfera; durante este proceso la energía es absorbida continuamente y después emitida por los gases componentes de la atmósfera. Midiendo la longitud de onda de la banda de absorción-emisión se puede determinar el perfil temperatura-altitud para un determinado gas.

Los satélites Nimbus poseen varios sensores; por ejemplo el Nimbus-7 lanzado a finales de 1978, tenía 8 sensores que permitían el análisis global de la atmósfera, de los océanos, de la interfase dinámica atmósfera-océano, y del equilibrio de calor terrestre. Todos estos datos constituyen una información esencial para el clima, la oceanografía, la polución atmosférica. Estos sensores remotos utilizan avanzada tecnología con objeto de obtener datos de los componentes de la atmósfera, del color de los océanos y la interfase dinámica entre la atmósfera y el océano.

La salida procedente de los sensores, se convierte en información digital almacenada en cintas, o bien es transmitida directamente a la Tierra cuando el vehículo espacial se halla en la posición conveniente para que su información sea recibida por la estación terrestre. Los datos son procesados en Tierra, transformándolos en información digital en cintas o en imágenes.

Uno de los sensores está proyectado para medir la radiación entrante y saliente y determinar, de esta forma, el equilibrio calorífico regional y global. El conocimiento del equilibrio global ayuda al científico a comprender como afectan al tiempo sinóptico los acontecimientos naturales y artificiales.

Otro de los sensores permite obtener el color de los océanos. Con ello se consiguen determinar las concentraciones de clorofila, salinidad y distribución de sedimentos, en los océanos. Estos sensores permiten el análisis rápido de grandes áreas de éstos, del orden de 1,3 millones de Km<sup>2</sup> en menos de dos minutos.

Este análisis a gran escala permite a los oceanógrafos determinar la distribución de las áreas de pesca. Se pueden encontrar nuevas áreas.

Mediante otro sensor se determinan las características de las capas de aerosoles a unos 20 Kms. de altitud y su efecto sobre el clima. La transmisión óptica a través de la atmósfera varía con el número

de moléculas que existen en el camino luminoso pero también con el número de partículas (aerosoles) (polvo, humo, etc.).

Los satélites Nimbus han jugado un papel muy importante en suministrar datos para edificar un cuerpo de conocimientos concernientes a la atmósfera. Además, estos datos han sido beneficiosos en proyectos relativos a la Geofísica.

Las nuevas generaciones de satélites aprovecharán los trabajos e investigaciones pioneras del programa Nimbus.

En 1979, durante el Experimento del Tiempo Global, cinco satélites geostacionarios cubrieron prácticamente toda la Tierra. Entre ellos hay que mencionar el lanzado en 1977 por la Agencia Europea del Espacio (ESA), denominado Meteosat. Este sistema estaba concebido de tal forma que podía suministrar de manera regular y automática, a partir de las imágenes brutas tratadas previamente, los parámetros antes mencionados.

Por otro lado, los datos obtenidos de los satélites se utilizarán cada vez más para fines de investigación. Contribuirán a perfeccionar los modelos atmosféricos de que hemos hablado. Asimismo, se progresará en el estudio de los métodos hidrotermodinámicos de predicción meteorológica a largo plazo.

La década de los 80 se caracterizará pues por medidas más precisas, procedentes de los satélites, del contenido de ozono, cantidad de aerosoles atmosféricos, componentes del balance de radiación, límite superior de la atmósfera, etc., es decir, un conjunto de parámetros que rigen la dinámica atmosférica.

Hemos visto que tanto los ordenadores como los satélites han influido en el progreso de las investigaciones meteorológicas, particularmente en las predicciones a medio y largo plazo. Las computadoras con sus grandes velocidades de cálculo y sus grandes memorias para almacenar datos, permiten procesar enormes masas de información en poco tiempo. Pero esto es precisamente lo que se necesita en los modelos para predecir el tiempo sinóptico y también para predecir los cambios climáticos, aunque en este caso no importa tanto la duración de los cálculos. Estos modelos se pueden comprobar y verificar su calidad en un lugar y día determinado, partiendo de los datos atmosféricos en los días anteriores, almacenados en la memoria del ordenador. De esta forma se puede comprobar el modelo para días distintos y regiones diferentes.

Por otro lado, los satélites constituyen otro factor importante que ha afectado positivamente las predicciones, mejorándolas. Ello es de-

bido a que pueden proporcionar más datos y más fiables que las estaciones terrestres. Por ejemplo, los satélites pueden proporcionar millones de fotografías de nubes de toda la Tierra que se almacenan codificadas en la memoria del ordenador. De esta forma cuando aparece una determinada situación atmosférica se puede buscar en el banco de datos otra semejante y obrar en consecuencia, suministrando al ordenador los datos adecuados para hacer la predicción correspondiente con varios días de anticipación, necesitando para ello 4 ó 5 horas.

El progreso en los ordenadores y en los datos suministrados por los satélites, redundará en una mayor eficacia en los modelos que se vayan estableciendo.

Sin embargo, si bien los datos suministrados por los satélites serán cada vez más fiables, también aumentarán en número. Hay que tener presente que las memorias de discos pueden almacenar cerca de mil millones de caracteres. El Servicio Meteorológico de EE.UU., por ejemplo, tiene que añadir nuevos discos cada mes. Esto complicará el modelo que será más complejo y su solución mediante el ordenador necesitará tiempos grandes respecto a los de predicción, a pesar del aumento de velocidad, casi seguro, de aquellas máquinas.

Ello quiere decir que los resultados serán superiores a los actuales pero que el progreso será lento.

Hay que tener presente, sin embargo, que las predicciones a largo plazo, de uno o más años, que son los más difíciles, pueden ser eficaces, aunque *no sean muy exactas*. Bajo el punto de vista del interés de las predicciones del clima, un pequeño error no tiene gran importancia, lo que sí la tiene es saber que en una estación determinada y en una región definida se produzcan lluvias o exista sequía, u otra característica meteorológica sin que se necesite precisar el día y la hora con varios meses de antelación. Ello es esencial bajo el punto de vista de la agricultura.

Ante estas breves consideraciones, alguien puede llegar a plantearse la siguiente pregunta: ¿La Meteorología es realmente una Ciencia?; creo que la contestación depende de lo que se entienda por Ciencia. Si uno de los requisitos que debe cumplir una rama científica es la fiabilidad en los pronósticos sobre el estado futuro de un fenómeno partiendo del estado presente del mismo, sin duda alguna las predicciones meteorológicas (sobre todo a medio o largo plazo) no cumplen aquellos requisitos. Pero si entendemos que una de las condiciones que debe reunir la Ciencia es la de ser capaz de explicar

Los fenómenos observados, entonces podemos asegurar que la meteorología cumple ampliamente esa condición.

Debemos esperar, aunque solo con relativo optimismo, que en el futuro el progreso en las investigaciones meteorológicas, gracias en parte a los ordenadores y a los satélites, permitan se cumpla la primera condición, además de esta última.

Y con esta esperanza termino mi breve intervención en el tema objeto del enjundioso y meditado discurso de nuestro nuevo compañero.

En nombre de la Real Academia de Ciencias reitero nuestra bienvenida al Prof. Catalá de Alemany y le doy mi más cordial felicitación junto con un emocionado abrazo.

Su gran valía científica y personalidad humana son garantía de que su incorporación a nuestras tareas será fecunda y dará honra y prestigio a la Real Academia y a la Ciencia española.