

Dos enfoques de la crisis ambiental

BARRY COMMONER

Se sabe ya que el mundo se debate en una crisis ambiental. El resultado potencial de ella se reconoce ampliamente: la autodestrucción de la civilización humana. Cada vez es más patente

su significado básico: la manera como utilizamos los recursos de la tierra es radicalmente errónea. El tipo de acción que exige la supervivencia se hace dolorosamente claro: la reorganización radical de la sociedad humana para armonizarla con el imperativo ecológico.

Nota: Este artículo se publicó primero en el *Journal of the Royal Institute of British Architects*, en noviembre de 1972, y luego en el *Journal of the American Institute of Planners*, en mayo de 1973. *Comercio Exterior* lo publica por primera vez en español con la autorización expresa del autor, quien dirige el Centro de Biología de los Sistemas Naturales, de la Washington University, en San Luis, Misuri, Estados Unidos, y con el permiso del *Journal of the American Institute of Planners*. [Traducción de Sergio Ortiz Hernán.]

Es reconfortante encontrar que, en los años más recientes, los estadistas, los industriales y, los que en mi opinión resulta más significativo, el público, están igualmente preocupados por la crisis ambiental y se muestran ansiosos por resolverla. Tan intensa es en verdad esta preocupación y tan urgentes las presiones en favor de actuar, que existe en la actualidad un

nuevo peligro, el de que la acción proceda al entendimiento y complique la crisis actual con nuevos desastros. Con esta idea en mente, deseo considerar en este trabajo los orígenes de la crisis ambiental y lo que podemos aprender de un análisis semejante acerca del tipo de acciones que pueden comenzar a resolverla.

Uno de los aspectos de la crisis ambiental que es motivo de perplejidad, consiste en que se refiere tanto a asuntos de acentuado carácter local como a asuntos muy vastos y generales. De esta concurrencia se derivan cuestiones graves y desconcertantes. Por ejemplo, ¿es preciso acaso que la Gran Bretaña, debido a la crisis ambiental del mundo, renuncie a su dependencia respecto a los recursos foráneos, especialmente alimentos? ¿Qué efectos tendría un cambio de ese tipo en las decisiones locales respecto al uso de la tierra y a la producción industrial? ¿Es tan inminente el colapso ecológico general como para hacer a un lado las prioridades locales de mejoría del ambiente? Es claro que no tiene sentido considerar un problema local relativo al ambiente de manera aislada con respecto al ámbito mundial. Después de todo, hay una gran diferencia, por ejemplo, para el futuro de la arquitectura y la planeación británicas en el caso de que en los nuevos edificios deba evitarse el uso del aluminio canadiense y en el de los automóviles el de petróleo árabe, así como en el caso de que la población futura de la Gran Bretaña por pura necesidad general tenga que reducirse a la mitad de su magnitud actual.

Con agudeza han sido presentados a nuestra atención temas como éstos, al publicarse un estudio patrocinado por el Club de Roma: *Los límites del crecimiento*, de Meadows *et al.*¹ El estudio se concibió como un análisis del problema en escala mundial, en la creencia de que "el significado esencial del proyecto radica en su concepción global, ya que la comprensión de las partes se logra mediante el conocimiento del todo y no al revés. . . Este informe presenta de manera directa las posibilidades a las que se enfrentan, no una nación o un pueblo, sino todas las naciones y todos los pueblos y de esa manera obliga al lector a elevar su mirada hasta las dimensiones de la problemática mundial". Se estimula al lector de *Los límites del crecimiento* a ver más allá de las pruebas inmediatas de la degradación ambiental (el agua estancada y los peces agonizantes, la ciudad ahogada por el neblismo, los trabajadores cesantes porque se cierra una planta industrial contaminadora) y a considerar si las tendencias generales son "en realidad tan amenazadoras como para anteponer su solución a las preocupaciones locales de corto plazo".

Lo anterior hace resaltar un tema básico del análisis de la crisis ambiental. Todos los estudios de ese género se ocupan de las interacciones entre los parámetros principales que rigen los efectos recíprocos de las actividades humanas en los recursos naturales y en el ambiente, tales como la población, el consumo de recursos y la emisión de contaminantes; también se ocupan de cómo cambiar el curso de dichas interacciones a fin de apartarnos de nuestra marcha autodestructiva actual. Ahora bien, ¿en qué escala geográfica interactúan estos factores? Para

mencionar a título de ejemplo un caso que se analizará después en detalle, si la producción de alimentos se logra aumentar gracias a un uso más intenso de fertilizantes a base de nitrógeno, los cuales a su vez exacerbaban la degradación ambiental debido a la lixiviación del nitrato en las aguas superficiales, cabe preguntar en qué escala, global, regional o nacional, se dan estas interacciones. Y, si como ocurre en este caso, la interacción se da en escala nacional o incluso menor, ¿cuál es el significado de ciertos análisis (como los presentados en *Los límites del crecimiento*) que describen las relaciones entre estadísticas mundiales que amontonan datos nacionales muy divergentes entre sí referidos a producción de alimentos, empleo de fertilizantes y contaminación?

Estas preguntas no tienen pronta respuesta; en mi opinión no puede suponerse, *a priori*, que la técnica analítica más válida sea ni la de los modelos para computadoras basados en estadísticas mundiales generalizadas, ni la del examen directo de las relaciones tal como ocurren en la realidad, en su escala real más que estadística. Nos encontramos en las primeras etapas del esfuerzo para entender la crisis ambiental y mucho puede aprenderse de una comparación directa entre diferentes enfoques.

En este trabajo me propongo comparar los resultados de dos análisis cualitativamente diferentes del problema de los recursos y la calidad del ambiente: a) el enfoque, ejemplificado por *Los límites del crecimiento*, que acepta como dados los datos estadísticos mundiales de las tendencias referentes al tamaño de la población, la producción agrícola e industrial, así como las tasas de la emisión de contaminantes, extrapola estas tendencias hacia el futuro y determina el resultado por medio de un modelo de computadora que incluye ciertas interacciones supuestas entre dichas tendencias. (Con respecto a *Los límites del crecimiento*, debe notarse que aunque se especifiquen claramente estas interacciones, no por ello dejan de ser supuestos, más que conclusiones derivadas del análisis de ciertos datos); y b) el enfoque, que se ilustra en lo que sigue, que reúne datos en la escala en la cual opera en el mundo real el sistema de que se trate y deriva de esos datos las relaciones que al parecer gobiernan las interacciones entre los diferentes parámetros, llegando así a generalizaciones acerca de los mecanismos de la interdependencia de la sociedad humana y los recursos naturales. Cabe anticipar desde luego la consecuencia, haciendo notar que los dos enfoques conducen a resultados muy diferentes.

Es útil comenzar con una breve comparación de los rasgos básicos de estos dos enfoques del problema ambiental. El enfoque ejemplificado por *Los límites del crecimiento* se basa en un modelo matemático en el cual se describe la red de relaciones entre una serie de parámetros referentes a los nexos recíprocos entre la sociedad humana y los recursos de los cuales ésta depende. El estudio de Meadows se ocupa de las relaciones entre cinco parámetros: población, producción de alimentos, industrialización, contaminación y consumo de recursos naturales no renovables. El estudio se basa en la observación empírica, válida en general en escala mundial, de que la intensidad de los cinco parámetros aumentan exponencialmente: "casi todas las actividades actuales de la humanidad, desde el uso de fertilizantes hasta la expansión de las ciudades, pueden representarse mediante curvas exponenciales de crecimiento". Después se emplean estas curvas empíricas y varias modificaciones de ellas

¹ Dennis L. Meadows, Donella H. Meadows, Jorgen Randers y William H. Benrens, *The Limits to Growth*, Universe Books, Nueva York, 1972. [Hay edición española: *Los límites del crecimiento*, Fondo de Cultura Económica, México, 1972.]

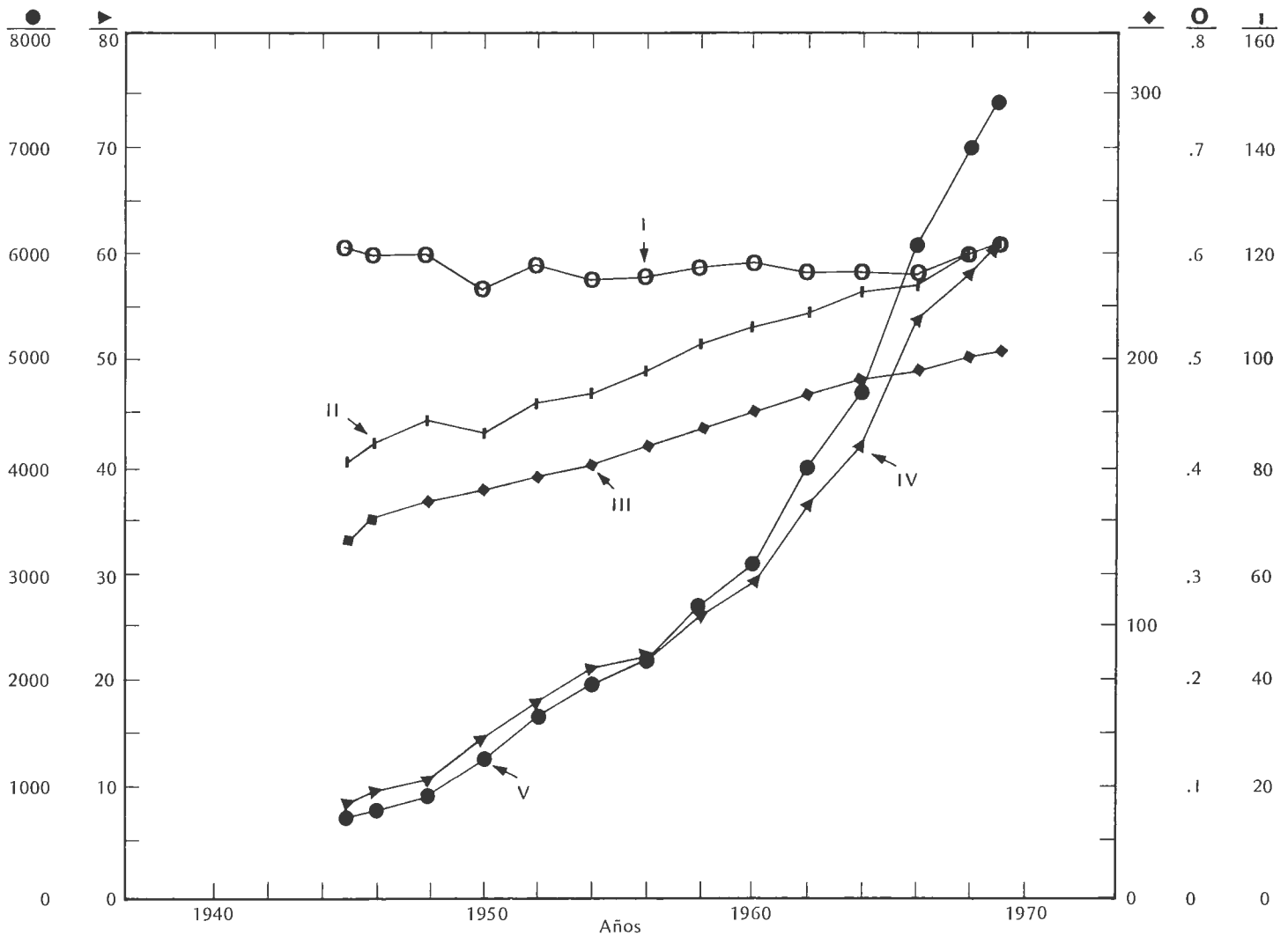
para regular la operación del modelo de computadora, generando con ello una serie de predicciones referentes a su curso futuro.

Es obvio que el resultado de estos cálculos depende de manera crucial de la estructura del programa de la computado-

ra, el cual expresa las relaciones que, a juicio de los investigadores, gobiernan las numerosas interacciones entre los cinco parámetros. El origen de las relaciones que se emplearon para elaborar el modelo de computadora se explica en *Los límites del crecimiento* como sigue: "primero enlistamos las relaciones causales importantes entre los cinco niveles (esto es, los pará-

GRAFICA 1

Aplicación de fertilizantes nitrogenados y producción agrícola de alimentos en Estados Unidos



- I. $\frac{\text{Índice de la producción agrícola de alimentos}}{\text{Población}}$, (unidades por 1 millón de habitantes)
- II. Índice de la producción agrícola de alimentos (unidades)
- III. Población (millones de habitantes)
- IV. $\frac{\text{Índice de la producción agrícola de alimentos}}{\text{Fertilizante nitrogenado}}$, (1000 ton de fertilizantes por unidades de producción)
- V. Fertilizante nitrogenado (miles de toneladas)

metros mencionados) y rastreamos la estructura espiral retroalimentadora. Para hacerlo, consultamos la literatura y a los profesionales de muchos campos de estudio relacionados con las áreas de que se trataba. . . Después cuantificamos cada relación con toda la exactitud que fue posible, empleando datos generales en los casos en que estaban disponibles y datos locales característicos en aquellos en que no existían mediciones globales”.

Así, primero se determinan las “relaciones causales” básicas (mediante un método que no se especifica con mayor detalle del ya citado) y después se insertan los datos reales referentes a las tendencias de los varios parámetros en el modelo matemático, computándose sus interacciones. Meadows *et al.* creen que las relaciones causales ya son conocidas y que “el modelo es simplemente un intento de reunir el gran cuerpo de conocimientos que ya existe acerca de las relaciones de causa y efecto entre los cinco niveles. . . y de expresar ese conocimiento en términos de espirales retroalimentadoras que se interconectan”. En todo caso, parecería que las relaciones de causa y efecto incorporadas en el modelo matemático *no se derivan de los datos* utilizados para cuantificar las relaciones, ya que entonces la operación entera sería una tautología matemática.

El segundo enfoque es en verdad el reverso del utilizado por Meadows *et al.* También en este caso se comienza con los datos que describen las tendencias de los diferentes parámetros. Sin embargo, se tiene cuidado de obtener los datos de un sistema real, específico, por ejemplo, el cinturón maicero de Estados Unidos. Después se derivan *de estos datos* conclusiones referentes a las relaciones causales que han regulado su comportamiento en el pasado, empleándose este conocimiento para describir diferentes cursos en el futuro. En cierto sentido, puede verse este segundo enfoque como una prueba empírica de la validez de “el gran cuerpo de conocimientos que ya existe acerca de las relaciones de causa y efecto” y por tanto también como una prueba de la validez del enfoque general adoptado por Meadows *et al.* Con estos antecedentes, podemos dedicar nuestra atención a algunos ejemplos específicos ilustrativos.

La contaminación ambiental proveniente del empleo de fertilizantes a base de nitrógeno en la producción de alimentos

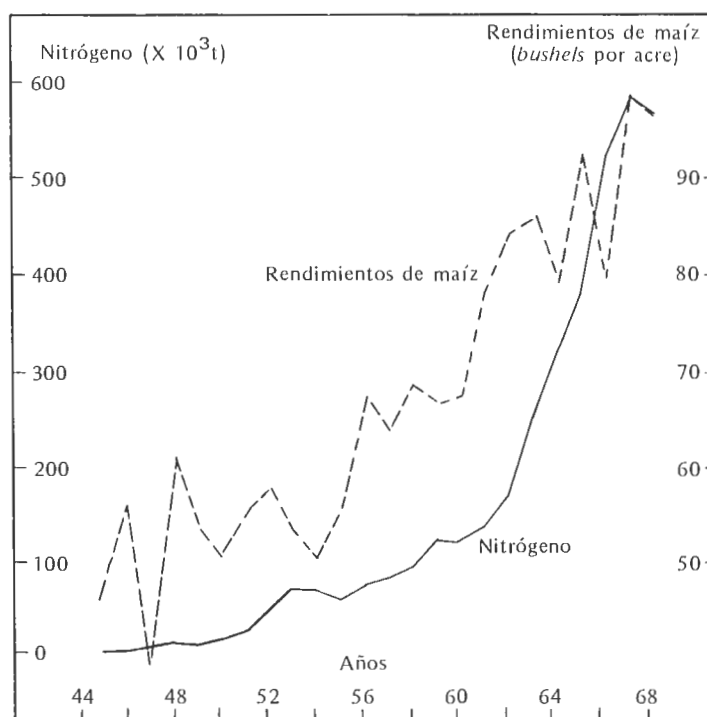
Según Meadows *et al.*, las “relaciones causales” pertinentes son las que siguen: el crecimiento de la población estimula la producción de alimentos, la cual a su vez intensifica ciertas prácticas agrícolas, tales como el empleo de fertilizantes, que conducen a la creciente degradación del suelo y provocan contaminación ambiental. Resulta instructivo comparar estas relaciones con los vínculos de causa y efecto que se obtienen de los datos reales.

En la gráfica 1 se presentan los datos fundamentales referentes a la producción de alimentos y al empleo de fertilizantes a base de nitrógeno en Estados Unidos. Las tendencias principales resaltan por sí mismas: pese a que el empleo total de fertilizantes nitrogenados ha aumentado exponencialmente desde 1945 (lo cual, como se verá, ha conducido a un aumento correspondiente de la contaminación del agua), dicho crecimiento exponencial no se observa en la producción total de alimentos, en la magnitud de la población o en la producción alimentaria *per*

capita. En el mismo período, la población de Estados Unidos ha crecido en cerca de 43% (a una tasa decreciente) y la producción total de alimentos sólo se ha mantenido al mismo ritmo que el crecimiento demográfico, de manera que la producción *per capita* ha sido en esencia constante. Así, el aumento exponencial de la utilización de fertilizantes no es una respuesta a un alza correspondiente de la demanda de alimentos. Tampoco puede argumentarse que el aumento de la producción alimentaria en Estados Unidos sea una respuesta al crecimiento exponencial de la población del mundo, puesto que las exportaciones agrícolas estadounidenses han sido una parte constante y relativamente pequeña de la producción agrícola total de ese país.

GRAFICA 2

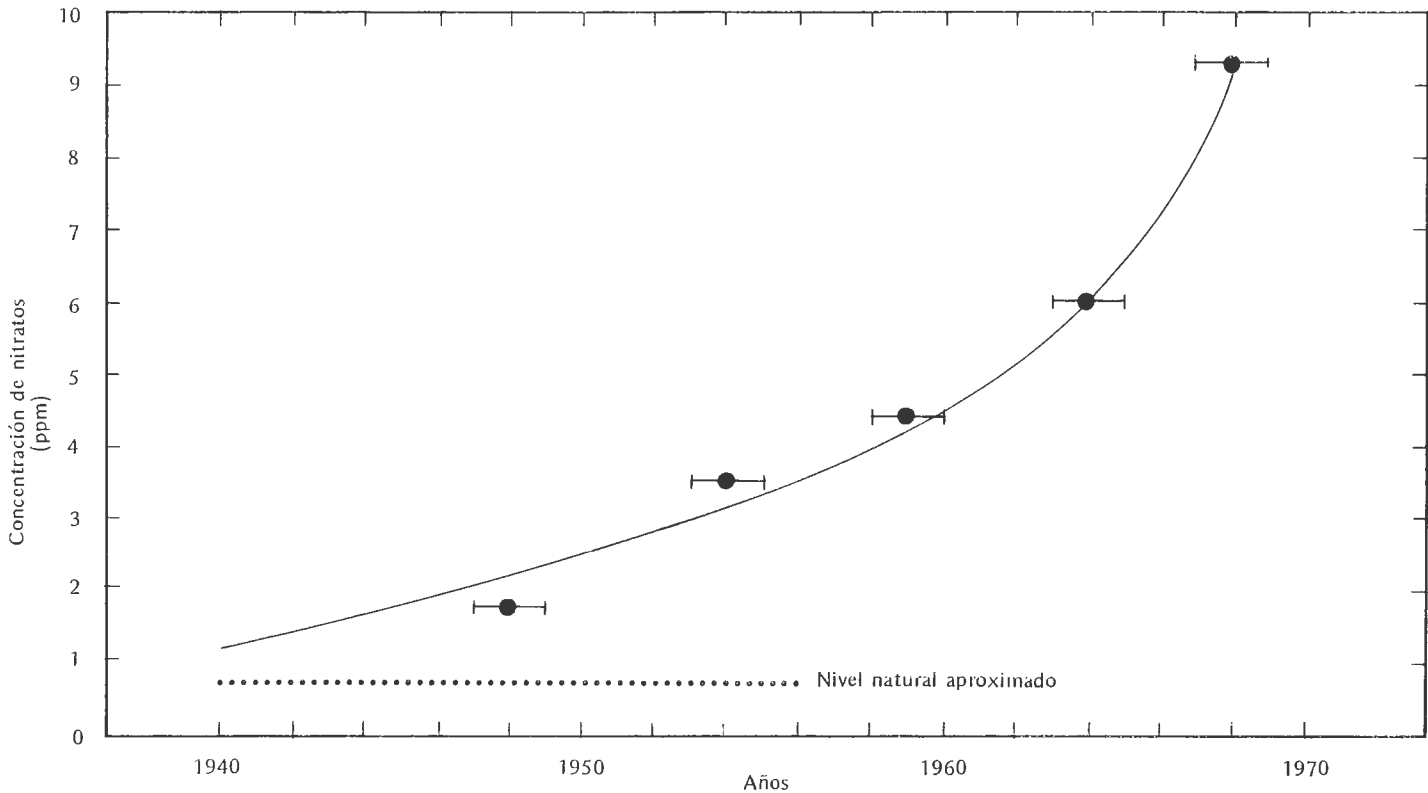
Rendimientos de maíz y aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en Illinois, como función del tiempo



En las gráficas 2 y 3 se muestra cómo el crecimiento exponencial del empleo de fertilizantes ha conducido en verdad a una tendencia correspondiente de los niveles de contaminación. Los datos de dichas gráficas se refieren al estado de Illinois, ya que los datos nacionales no están disponibles. En la gráfica 2 se observa que el consumo de fertilizantes a base de nitrógeno se ha elevado exponencialmente desde 1945 en dicho estado, igual que en el país en su conjunto. De la misma manera, en la gráfica 3 puede verse que también se ha elevado exponencialmente desde 1945 la concentración de nitrato en los ríos de Illinois, contaminación que estimula el excesivo creci-

GRAFICA 3

Concentraciones máximas de nitratos en los ríos de Illinois



miento de las algas y aumenta los riesgos de metahemoglobinemia, la que provoca que la sangre, especialmente de los niños, pierda su capacidad de transportar oxígeno.

Así, si los datos anteriores confirman la conclusión general de que los niveles de contaminación han crecido exponencialmente, también muestran que este efecto no obedece a un crecimiento comparable de la población ni al aumento general de la producción de alimentos. En suma, los datos no se adaptan a la relación de causa y efecto incorporada en el modelo mundial de Meadows *et al.* ¿Existe acaso una explicación mejor?

Los datos mencionados aportan esa explicación. Nótese que en la gráfica 1 existe un estrecho paralelismo entre el crecimiento exponencial del empleo de fertilizantes y otra tendencia, *la del aumento del fertilizante empleado por unidad de alimentos producidos*. Este paralelismo muestra que la causa básica del crecimiento exponencial en el empleo de fertilizantes y en la lixiviación del nitrato contaminador en las aguas superficiales que de ello resulta, es un cambio específico en la tecnología de la producción alimentaria, es decir, se trata de la dependencia creciente respecto al fertilizante como fuente de nitrógeno para las cosechas, más que del aumento de la población o de la producción *per capita* de alimentos.

Son considerables las consecuencias operacionales de la disparidad entre la "relación de causa y efecto" supuesta por Meadows *et al.* y la que surge de los datos reales. Si, como suponen Meadows y colaboradores, la contaminación por nitrato refleja la tasa general de la producción de alimentos, la cual a su vez está impulsada por el crecimiento demográfico, entonces resulta claro que para dominar el problema de la contaminación se requiere reducir el tamaño de la población o la producción alimentaria *per capita*, o bien ambas magnitudes. Por otra parte, se obtiene un resultado muy diferente si la respuesta al problema de la contaminación se basa en los datos reales. Esto queda ilustrado por los datos de la gráfica 4, en la cual se muestra la relación entre el nivel de la contaminación por nitrato y la tasa de aplicación de fertilizante en las tierras drenadas por varias secciones de la línea divisoria de aguas en el cinturón maicero de la parte central de Illinois, durante el período 1967-1969. De inmediato se nota que la concentración de nitrato difiere significativamente de la que caracteriza a las aguas naturales (0.5-1.0 partes por millón de nitrógeno en forma de nitratos) sólo cuando la tasa de aplicación de fertilizante exceda las 30 libras de nitrógeno por acre drenado. Puesto que la tierra de cultivo a la que se aplica fertilizante, la cual se dedica casi por completo al maíz, representa cerca de un tercio de la superficie total, la cifra anterior significa que se aplican cerca de 90 libras de fertilizantes nitrogenados por acre

de maíz. A medida que la tasa de aplicación de fertilizante se eleva a cerca de 50 libras por acre drenado o 150 libras de nitrógeno por acre de maíz, el nivel del nitrato en el río se eleva agudamente y se aproxima al límite tolerable para el agua potable, establecido por el Servicio de Salud Pública de Estados Unidos (10 ppm de nitrógeno en forma de nitrato). Cabe aclarar que las aguas de muchos de esos ríos se emplean para dotaciones de agua potable.

La fisiología de la nutrición de la planta con nitrógeno explica de inmediato la relación anterior. Hasta tasas de aplicación cercanas a 90 libras por acre, la planta de maíz absorbe con eficacia el fertilizante a base de nitrógeno; a tasas superiores, el cultivo se satura, de manera que cuando la aplicación de fertilizante se aumenta cerca de 90 a 150 libras por acre, el rendimiento de la cosecha sólo se eleva en promedio entre 15 y 20%. Así, el rápido incremento de nitrato en los ríos cuando la zona se fertiliza a tasas superiores a 90 libras de nitrógeno por acre de maíz se debe a la lixiviación del fertilizante no absorbido, de la tierra hacia los ríos. Hemos efectuado estudios directos acerca del origen de la lixiviación del nitrato de la tierra a los ríos (con base en la determinación de los isótopos de nitrógeno) cuyos resultados apoyan de manera directa esta conclusión.²

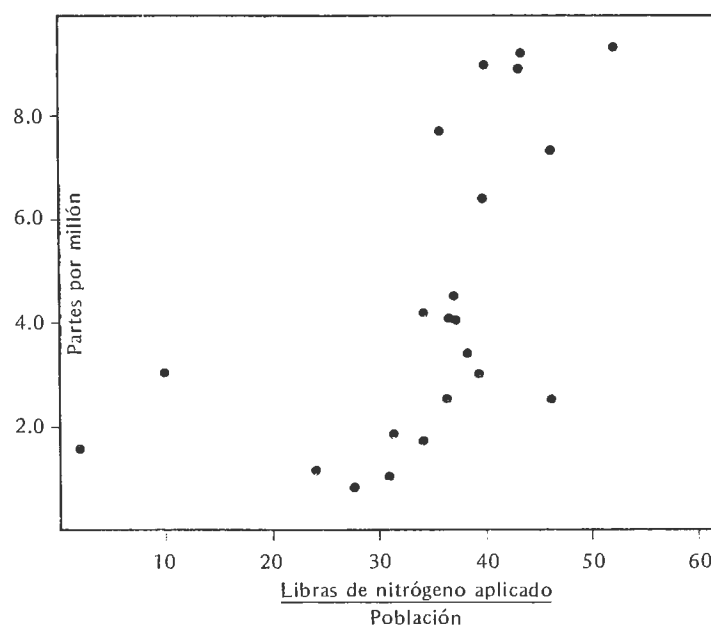
Las consecuencias prácticas de estas consideraciones son manifiestas. Si se redujese la tasa de aplicación de fertilizante, de cerca de 150 libras de nitrógeno por acre de maíz hasta cerca de 75 a 90 libras por acre, podría eliminarse básicamente el problema de la contaminación por nitrato al costo de una disminución en las cosechas de 15 a 20 por ciento. A mayor abundamiento, mediante una simple maniobra administrativa podría reducirse el nivel de contaminación sin pérdida alguna en el monto cosechado. En Estados Unidos, el crecimiento rápido del empleo de fertilizantes desde 1945 a la fecha ha ido acompañado de una disminución de aproximadamente 16% en la superficie cultivada, debida en buena parte al programa gubernamental de mantener los precios agrícolas mediante restricciones de la producción. Por tanto, por lo menos en este caso (que debe considerarse seriamente en vista de que hasta donde alcanza mi conocimiento es el único en el cual se dispone de los datos necesarios), podría revertirse en lo fundamental el crecimiento exponencial de los niveles de contaminación sin cambio alguno en el tamaño de la población o en la producción alimentaria *per capita* mediante el sencillo expediente (desde el punto de vista físico, ya que no del económico y político) de invertir el desplazamiento de tierra por fertilizante, observado en la posguerra.

Es evidente, a mi entender, que los dos enfoques del problema conducen a resultados muy divergentes entre sí. Específicamente, tienen significados muy diferentes, según el enfoque de que se trate, la forma exponencial de la curva del empleo de fertilizante y el aumento comparable de la contaminación por nitrato que de ella resulta. En el método de Meadows *et al.* no se busca razón alguna para explicar la forma de la curva: sin embargo, dada la naturaleza de las relaciones programadas en el modelo, la curva se utiliza *como si* su forma exponencial se debiera a un aumento exponencial de la deman-

da de alimentos. Así, sin considerar la razón *real* que explique la forma de la curva, éste se utiliza en el modelo de una manera que le confiere un significado operativo específico, un significado que necesariamente se refleja en los resultados del cálculo. De modo inevitable, este proceso conduce a resultados conforme a los cuales la demanda de alimentos asume una importancia que deriva de una relación supuesta, más que de una relación demostrada.

GRAFICA 4

Concentraciones de $\text{NO}_3\text{-N}$ 1967-1969
(Media ponderada de la descarga anual)



En verdad, lo que los datos muestran es que la forma de la curva de empleo de fertilizantes obedece a un cambio progresivo de la tecnología de la producción alimentaria, más que a variaciones de la cantidad de alimentos producidos. Por tanto, cualquier efecto que esta curva tenga en el resultado final de los cálculos debe atribuirse al cambio tecnológico y no a la demanda de alimentos. Es difícil ver cómo el empleo de esta curva en cálculos del tipo que utilizan Meadows *et al.* podría producir resultados que no estuviesen viciados seriamente por esta disparidad entre el significado real de los datos y el atribuido a ellos por la estructura del modelo mismo. Esto equivale a emplear una palabra definida falsamente para construir una frase; en este caso, es obvio que el significado de la frase probablemente no refleje el sentido real de la palabra. En cierto modo, es el modelo, y no los datos, lo que confiere significado al resultado de los cálculos. Con independencia respecto a su verdadera significación, la estructura de la frase define a la palabra de cierta manera.

Contaminación por el plomo proveniente de los vehículos automotores

La contaminación ambiental debida al plomo aporta otra prueba de esta conclusión general. En Estados Unidos, la

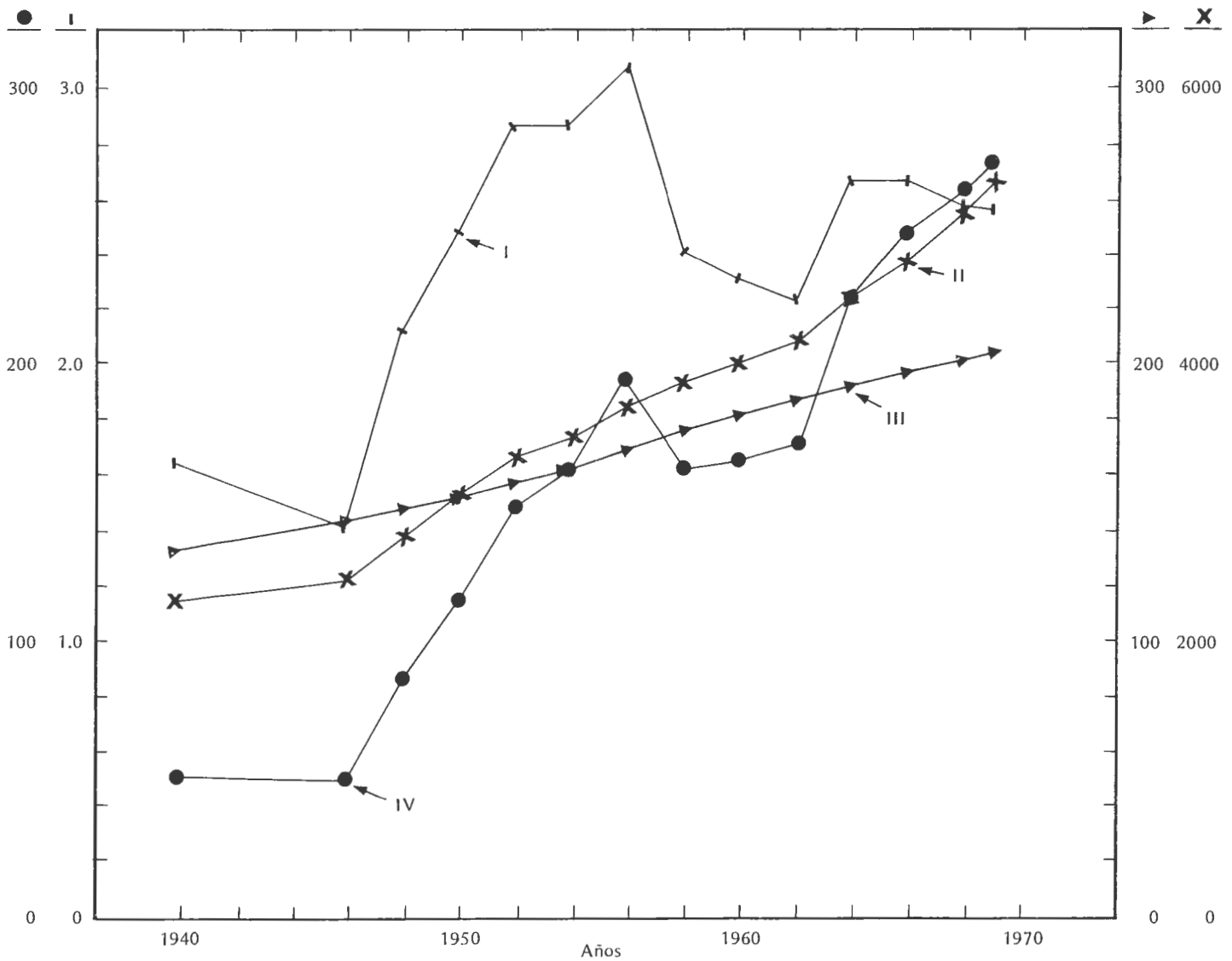
² Daniel H. Kohl, Georgia B. Shearer y Barry Commoner, "Fertilizer Nitrogen: Contribution to Nitrate in Surface Water in a Corn Belt Watershed", en *Science*, núm. 174, diciembre 24 de 1971, pp. 1311-1334.

fuente principal de contaminación ambiental por plomo es el tetraetilo de plomo que se agrega a la gasolina de alto octanaje utilizada en los motores modernos de alta compresión. En la gráfica 5 puede advertirse que a partir de 1945 ha ocurrido el aumento exponencial esperado del consumo anual

de tetraetilo de plomo, casi todo el cual se lanza al aire como contaminante. Empero, nuevamente el aumento demográfico es demasiado pequeño para explicar dicho crecimiento. Lo que ocurre es que hay un aumento significativo del "consumo", expresado en términos de vehículos-milla *per capita*. No obstante,

GRAFICA 5

Tetraetilo de plomo y transporte terrestre



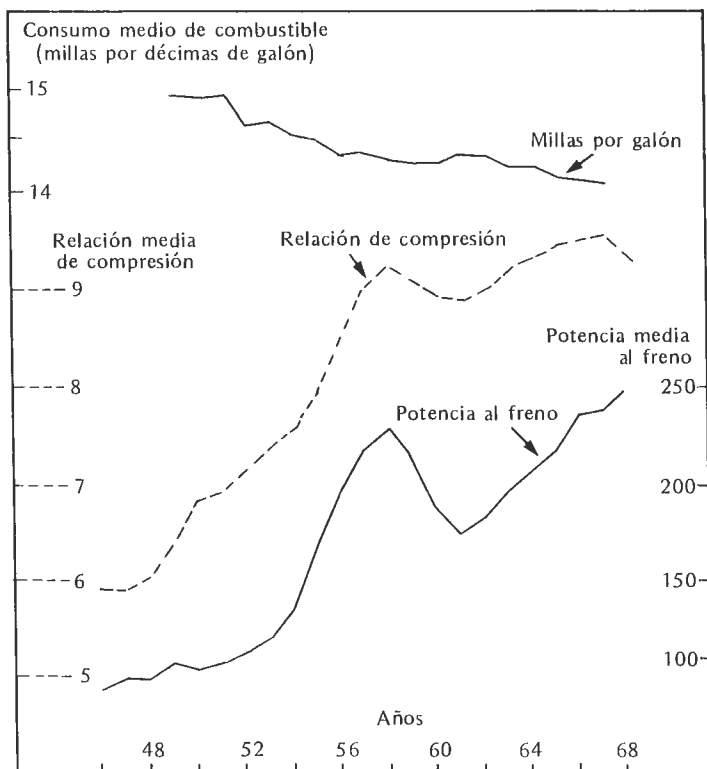
- I. $\frac{\text{Toneladas de plomo}}{\text{Vehículos-milla}}$ (decenas de millón)
- II. $\frac{\text{Vehículos-milla}}{\text{Población}}$
- III. Población (millones de habitantes)
- IV. Plomo (miles de ton)

te, también existe un notable aumento del factor "tecnológico", esto es, del plomo consumido por vehículo-milla.

Los datos de la gráfica 5 ejemplifican de varias maneras la importancia relativa del factor tecnológico en comparación con la población y con el "consumo". En primer lugar, considérese la importancia de la baja sorprendente del consumo total de plomo y del plomo por vehículo-milla ocurrida en el período 1958-1962, la cual representa un cambio que en efecto significó una caída de 8 a 10 años en la marcha del crecimiento exponencial del consumo de plomo, logro nada despreciable conforme a la escala temporal de las catástrofes predichas en el estudio de Meadows y colaboradores. La causa de este fenómeno queda manifiesta en la gráfica 6. En ella se muestra que el período 1958-1962 se caracterizó en Estados Unidos por una reversión temporal de la tendencia omnipresente hacia mayor potencia y mayores relaciones de compresión de los automóviles de turismo, tendencia que aumenta de manera correspondiente la demanda de gasolina que contiene plomo. Dicha caída se debió a la aparición de los automóviles compactos estadounidenses a fin de competir con los producidos en el extranjero; después de 1962 hubo un aumento gradual de la potencia y de la relación de compresión de aquellos autos, restableciéndose la tendencia en favor de crecientes emisiones de plomo.

GRAFICA 6

Tendencias de las relaciones de compresión de los motores de automóviles, potencia al freno y consumo medio de combustible en millas por galón



Desde luego, lo que los datos muestran es el hecho de que la emisión de plomo es un acompañamiento totalmente innecesario de los viajes en automóvil. Los motores pequeños de baja compresión pueden funcionar con gasolina de bajo octanaje que no contenga plomo transportando con buen éxito a las personas, si bien con cierto sacrificio de la aceleración y las altas velocidades. En los modelos mundiales de Meadows y colaboradores, la tasa de emisión de un contaminante (en este caso, el plomo) está generada por la oferta *per capita* de la industria (en este caso, del transporte) y por el crecimiento demográfico. Los datos anteriores conducen a una conclusión diferente en lo que respecta a esta "relación causal": el aumento exponencial de la contaminación por plomo a partir de 1945 se debe en gran medida a los cambios en la tecnología del transporte automovilístico.

Una vez más, las interrelaciones que surgen de los datos reales sugieren remedios muy diferentes de los propugnados en el estudio de Meadows *et al.* Específicamente podrían eliminarse por completo las emisiones de plomo provenientes del transporte automovilístico mediante el rediseño básico del motor. Lo mismo puede decirse del neblihumo fotoquímico, el cual es activado por la emisión de óxidos de nitrógeno provenientes de los autos, óxidos asociados sólo con los motores modernos de alta compresión y que podrían eliminarse en gran parte mediante el simple expediente de regresar a los diseños de baja compresión anteriores a 1940.

Por supuesto, incluso con esas mejoras, el motor de combustión interna emitirá otros contaminantes, tales como el monóxido de carbono, aunque también en este caso puede ser eficaz cierta clase de cambio tecnológico en el diseño de zonas urbanas, por ejemplo, para disminuir la necesidad de viajar en automóvil. En efecto, gran parte de los viajes en automóvil en Estados Unidos se deben sólo a desplazamientos entre el hogar y el lugar de trabajo. Además, la creciente separación entre los sitios de trabajo y los de residencia en las zonas metropolitanas de Estados Unidos es por sí misma una consecuencia del decaimiento de las ciudades interiores de ese país. El resultado es que los habitantes de las zonas suburbanas necesitan trasladarse a la ciudad para trabajar, en tanto que muchos pobladores de las zonas marginadas viajan hacia las fábricas de la periferia o hacia los suburbios para emplearse como trabajadores domésticos. De igual forma, en Estados Unidos podrían reducirse drásticamente las altas cifras de consumo de combustible y con ello la contaminación ambiental concomitante, invirtiendo la tendencia actual de sustituir el transporte de carga por ferrocarril por transporte camionero, ya que en éste se utiliza cerca de 6 veces más combustible por tonelada-milla que en el transporte ferroviario.

En suma, los datos reales muestran que el aumento exponencial del consumo de combustible y de las emisiones de plomo y otros contaminantes debidos al transporte automotor, reflejan cambios de la tecnología del automóvil y del diseño de los sistemas de transporte, mucho más que aumentos demográficos o del consumo *per capita*. Por tanto, una vez más surgen serias dudas acerca del significado de las predicciones generadas por un modelo matemático en el cual se utilizan estas mismas tendencias exponenciales para cuantificar una relación que, al contrario de lo que se comprueba con los datos mismos, se

supone que refleja sobre todo aumentos del tamaño de la población y de la demanda *per capita*.

Energía eléctrica

La generación de electricidad es una notoria fuente de contaminación de difícil tratamiento. Siempre existe *algún* costo ambiental ligado a la generación y uso de la electricidad, aunque sólo sea por la necesaria emisión de calor en el ambiente. En el modelo de Meadows y colaboradores, las relaciones causales básicas se refieren al consumo de bienes, la actividad industrial y la emisión de contaminantes. Así, la elevación exponencial del consumo de energía eléctrica se atribuye a la creciente demanda de mercancías producidas con el concurso de la electricidad, fenómeno que a su vez es consecuencia de la creciente demanda *per capita* y del aumento demográfico. Nótese que en este patrón se supone una relación invariable entre la cantidad de electricidad y la producción de una cantidad dada de bienes económicos.

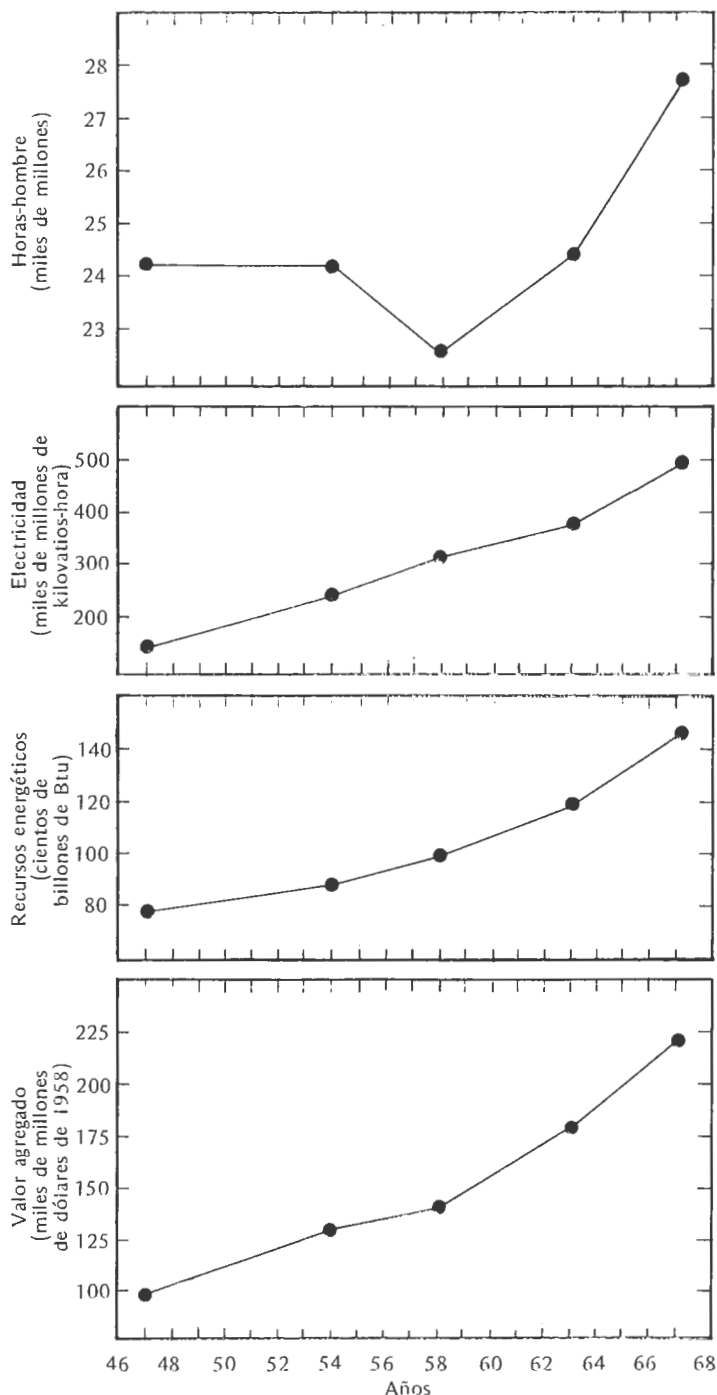
Esta relación queda sometida de inmediato a prueba.³ En el caso de la utilización de energía en la industria de Estados Unidos existen datos concernientes a la relación entre las mercancías producidas en las operaciones industriales y el consumo de energía eléctrica. Lo producido se mide por el valor agregado, que representa el valor de las mercancías vendidas menos el costo de los materiales y la energía necesarios para producirlas, expresado en dólares de 1958 a fin de eliminar los efectos de la inflación. En la gráfica 7 se observa que desde 1947 el valor agregado y la electricidad consumida en la producción industrial total de Estados Unidos se han elevado exponencialmente aunque a tasas anuales algo diferentes. En general, el valor agregado ha aumentado cerca de 2.3 veces, de casi 96 000 millones de dólares a cerca de 222 000 millones de dólares (estas cifras se computan en dólares de 1958 para compensar la inflación); la electricidad consumida se ha elevado cerca de 3.6 veces, de casi 141 000 millones a casi 506 000 millones de kilovatios-hora. Los recursos energéticos totales utilizados en la industria, esto es, el contenido de energía de todos los combustibles empleados en la industria, incluyendo los necesarios para producir electricidad, casi se han duplicado en el mismo período. El trabajo utilizado en la industria sigue un curso claramente diferente. El total de horas-hombre utilizadas al año en la actividad industrial de Estados Unidos sólo creció 1.1 veces, de 24 300 millones en 1947 a 27 800 millones en 1967.

Existe una analogía estrecha y útil entre los papeles desempeñados por el trabajo y la energía eléctrica en la producción industrial. Ninguno de los dos elementos es susceptible de almacenarse; ambos sólo adquieren valor cuando se utilizan, y se consumen en el curso del proceso en el cual intervienen. Además, existe una ceñida relación funcional entre los papeles del trabajo y de la energía eléctrica en la actividad productiva,

³ Esta parte del trabajo se basa en Barry Commoner y Michael Corr, "Power Consumption and Human Welfare", ensayo presentado en el Simposio sobre la Crisis Energética, celebrado por la AAAS en Filadelfia, en diciembre 29 de 1971. También presentado como "Electric Power Consumption and Human Welfare: A Selection of Papers on the Social, Technological and Environmental Problems of Electric Power Consumption", inédito, preparado para el Grupo de Estudio de la Energía del Comité de Alteraciones Ambientales de la AAAS y el Grupo Especial de Energía Eléctrica del Scientists' Institute for Public Information.

GRAFICA 7

Utilización de la energía eléctrica en el sector industrial de Estados Unidos

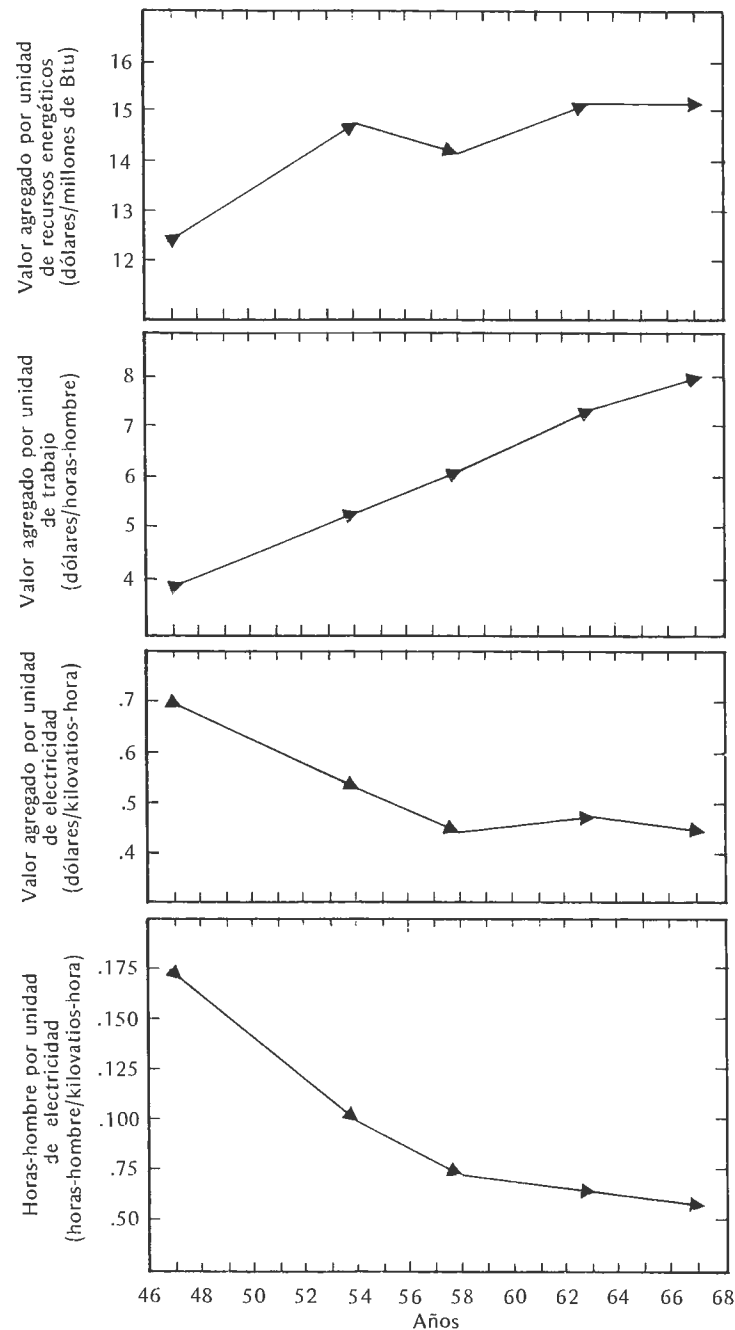


Fuentes: Datos del Departamento de Comercio de Estados Unidos, 1971 *Horas-hombres y valor agregado*, vol. 1, p. 26. Electricidad y recursos energéticos (excepto estos recursos en 1947), SR 4, pp. 8-9. Los recursos energéticos en 1947 se tomaron de Lyon, 1951.

puesto que la segunda es el medio más conveniente de sustituir y ampliar la energía muscular y la capacidad manipulativa de los seres humanos.

GRAFICA 8

Productividad del trabajo y productividad de la energía en la industria de Estados Unidos

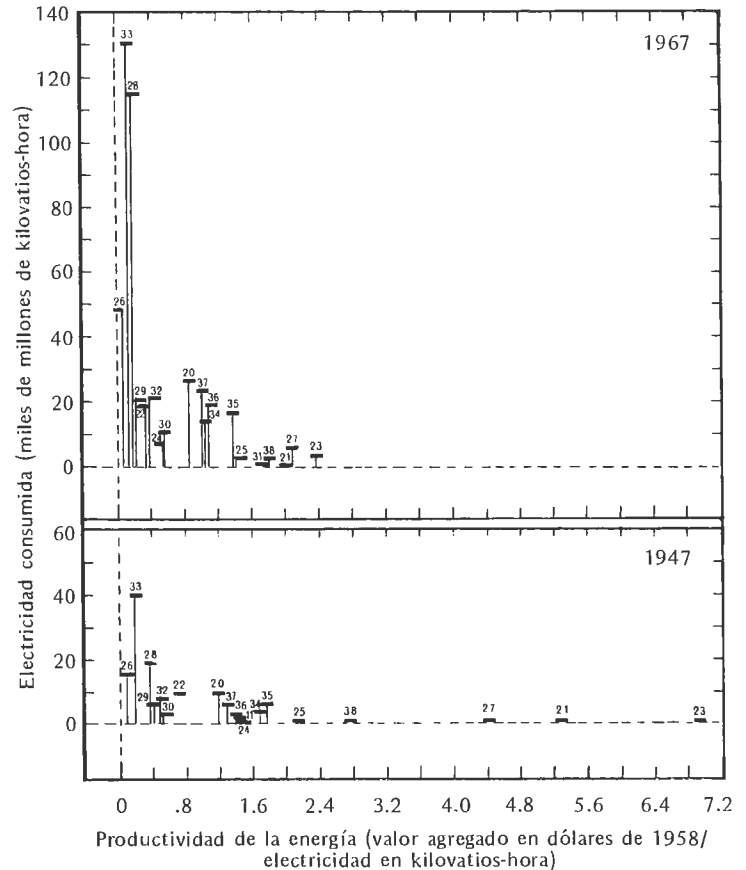


Fuente: Elaborada con base en los datos de la gráfica 7

El valor económico del trabajo usualmente se expresa mediante el término *productividad del trabajo*, medida por el valor agregado por hora-hombre de trabajo. Por analogía con la productividad del trabajo, es posible representar la *productividad de la energía* de una empresa industrial como un cociente entre el valor agregado y la electricidad consumida. La gráfica 8 muestra los notables cambios ocurridos a partir de 1947 tanto en la productividad del trabajo como en la productividad de la energía en la industria de Estados Unidos. Sin embargo, las variaciones se han dado en direcciones opuestas. Ha habido un aumento continuado de la productividad del trabajo, aunque la tasa de incremento ha declinado en años recientes: el cambio general es de cerca de dos veces en un lapso de 20 años. En contraste con ello, la productividad de la energía declinó agudamente entre 1947 y 1958, permaneciendo más o menos constante desde entonces. En conjunto, desde 1947 ha ocurrido una declinación de la productividad de la energía en la industria, equivalente a 35 por ciento.

GRAFICA 9

Productividad de la energía y consumo de energía eléctrica conforme a la Standard International Classification (SIC), de dos dígitos, 1947 y 1967



Fuente: Datos del Departamento de Comercio de Estados Unidos, 1949 y 1971

CUADRO 1

Productividad de la energía eléctrica y de las horas-hombre en las manufacturas

	Valor agregado Dólares de 1958 x 10 ⁹		Energía eléctrica utilizada. Kilo- vatios-hora x 10 ⁹		Productividad de la energía eléc- trica. Dólares de 1958/Kilova- tios-hora		Productividad de las horas-hombre. Dólares de 1958/ horas-hombre		Productividad de los recursos energéticos Dólares de 1958/10 ⁹ Btu	
	1947	1967	1947	1967	1947	1967	1947	1967	1947	1967
Vestido	5.87	8.53	0.86	3.61	6.91	2.36	3.24	3.92	173	119
Manufactura de tabaco	0.85	1.73	0.16	0.85	5.26	2.03	4.28	13.72	79	71
Imprentas y editoriales	5.62	12.17	1.28	5.82	4.39	2.09	6.33	10.18	173	115
Cueros y sus productos	2.03	2.23	0.57	1.33	3.54	1.67	3.00	4.06	55	53
Instrumentos	1.51	5.44	0.55	3.08	2.77	1.77	3.87	10.27	74	78
Muebles y adornos	1.78	3.54	0.83	2.52	2.16	1.40	3.05	4.94	55	56
Grupo A	17.66	33.64	4.24	17.21	4.17	1.95	3.88	6.35	105	89
Maquinaria	10.36	23.61	5.92	17.26	1.76	1.37	4.00	8.48	57	56
Productos metálicos	6.51	15.30	3.90	14.76	1.67	1.04	3.84	7.08	38	39
Madera y sus productos	3.33	4.22	2.34	7.97	1.43	0.53	2.66	4.32	29	18
Equipo eléctrico	5.11	20.77	3.62	19.20	1.41	1.08	4.00	7.95	46	57
Equipo de transporte	7.73	23.89	6.06	23.56	1.28	1.01	3.94	8.70	48	45
Alimentos	12.06	22.57	10.18	26.79	1.18	0.84	5.09	9.99	18	17
Grupo B	45.10	110.36	32.02	109.54	1.41	1.01	4.05	8.15	33	37
Textiles	7.04	6.91	10.04	20.80	0.70	0.33	3.05	4.09	21	16
Productos de caucho y de plástico	1.72	5.77	3.45	10.77	0.50	0.54	4.05	7.07	15	23
Productos de piedra, arcilla y vi- drio	3.04	7.07	8.02	20.81	0.48	0.36	3.063	7.45	3	4
Petróleo y productos del carbón	2.63	4.60	6.50	22.28	0.41	0.21	7.44	22.78	4	3
Productos químicos	7.03	19.97	19.61	116.83	0.36	0.17	7.21	18.39	7	7
Papel y productos conexos	3.85	8.27	15.39	49.07	0.25	0.17	4.50	7.72	6	7
Metales básicos	7.58	16.94	40.65	131.95	0.19	0.13	3.69	8.11	2	5
Grupo C	32.89	69.53	103.66	372.51	0.32	0.19	4.21	8.80	6	6
MANUFACTURAS	95.65	213.53	139.92	499.26	0.68	0.43	4.07	7.99	11.2	14.4

En la gráfica 9 se aprecian los cambios ocurridos respecto a la productividad de la energía y al consumo de energía en los diferentes sectores de la industria entre 1947 y 1967. En primer lugar resulta evidente el hecho de que en ese período la productividad de la energía ha disminuido en casi todos los sectores. En 1947 la productividad más alta de la energía (casi 6.9 dólares de valor agregado por kilovatio-hora) se daba en la industria del vestido. En 1967 dicha industria estaba todavía entre las que tenían la más alta productividad de la energía, aunque a un nivel de 2.4 dólares de valor agregado por kilovatio-hora. Al mismo tiempo, debido en parte a la disminución de la productividad de la energía y en parte al aumento de la producción total entre 1947 y 1967, la cantidad total de electricidad consumida por esa industria aumentó varias veces. En casi todos los sectores industriales existen estas tendencias.

Una segunda característica que se aprecia en la gráfica 9, junto con el cuadro 1, es que el consumo de energía en las industrias de transformación que tienen muy bajas productividades en esa materia, tales como las de metales básicos (SIC, 33), papel y productos conexos (SIC, 26), productos químicos (SIC, 28), petróleo y productos del carbón (SIC, 29), todas del grupo C, contribuyó mucho más al crecimiento absoluto del consumo energético que el de los grupos A o B.

En el cuadro 1 se presenta la tasa de crecimiento del consumo energético en tres grupos de industrias, clasificadas conforme a la productividad de la energía imperante en 1947. El grupo de productividad más baja (de 0.19 a 0.70 de dólar por kilovatio-hora) contribuyó con 75% al aumento del consumo de energía de todas las manufacturas entre 1947 y 1967.

Sin embargo, la contribución de este grupo de industrias al aumento del valor agregado de todas las manufacturas en el período 1947-1967 fue de sólo 27%. La aportación al aumento del consumo nacional de energía por los grupos de industrias de productividades de energía entre 0.70 y 1.76 de dólar, fue sólo de 22%. No obstante, este grupo de industrias contribuyó con 48% al aumento del valor agregado total, aporte que fue con mucho el mayor de las industrias incluidas en los tres grupos. Por último, el grupo de industrias con productividades de energía superiores a 1.76 dólares aportó sólo 4% al aumento del consumo de energía, en tanto que su contribución al crecimiento del valor agregado por las manufacturas fue de 12 por ciento.

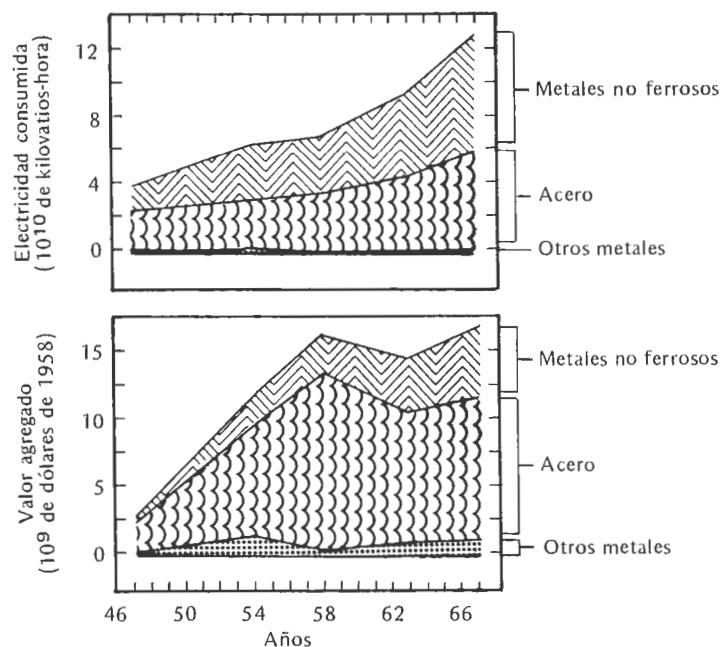
Con base en este análisis, resulta evidente que el rápido aumento del consumo industrial de energía no ha estado acompañado por un crecimiento comparable del valor de las mercancías producidas en el sector, en buena medida debido a que unas pocas ramas que contribuyen con una parte relativamente pequeña del crecimiento económico real de la industria, son responsables de buena parte del aumento del consumo de energía. El rápido crecimiento de éste se debe en gran parte a las ramas que utilizan la energía con *menos eficiencia*: metales básicos, productos químicos y productos del petróleo, sobre todo.

Relaciones semejantes se evidencian en el seno de un grupo específico de industrias, tal como el de los metales básicos. Como se observa en la gráfica 10, existen considerables diferencias en la productividad de la energía de los principales miembros de este grupo, el acero y los metales no ferrosos, en

especial el aluminio. Así, por ejemplo, la productividad de la energía en la producción de acero era de 0.183 de dólar por kilovatio-hora en 1967, mientras que la del aluminio era de 0.013 de dólar por kilovatio-hora. En la gráfica 10 también es dable observar que los metales no ferrosos, cuya aportación al valor agregado total por las ramas de metales básicos es significativamente menor que la del acero, consumen ahora la parte mayor de la electricidad en este grupo. De nuevo se encuentra que las actividades industriales que utilizan la energía con menos eficacia contribuyen de manera desproporcionada al rápido aumento de la electricidad consumida por la industria.

GRAFICA 10

Industrias de metales básicos



Fuentes: Datos del Departamento de Comercio de Estados Unidos, 1971, SR4, y vol. 1, de 1949, 1957, 1961 y 1966. Los datos referentes al acero provienen de la SIC 331 y 332. Las cifras de los metales no ferrosos provienen de la SIC 333, 334, 335 y 336. Las correspondientes a otros metales, de la SIC 339.

Estos datos ilustran otra tendencia importante: la de que las industrias que trabajan con bajas productividades de energía desplazan a las que funcionan con altas productividades. Así, la producción de metales no ferrosos, especialmente el aluminio, ha crecido con mucha mayor rapidez que la producción de acero, en gran parte debido a la sustitución de los productos de acero (y de madera) por productos de aluminio. De la misma manera, el crecimiento de la industria química —la cual tiene una productividad de la energía muy baja— se basa en gran medida en el desplazamiento de varios productos naturales que requieren un consumo energético muy pequeño, tales como el algodón, la lana, la madera y el jabón hecho de grasas, en favor de productos químicos sintéticos, tales como las fibras artificiales, los plásticos y los detergentes.

Así, una buena parte del aumento del consumo industrial de energía se debe no tanto a la expansión general de la actividad manufacturera, como a la introducción de nuevos productos consumidores de energía. Puesto que nuestra atención se dirige a la elasticidad de este proceso, especialmente a la posibilidad de revertirlo, es importante preguntarse si los desplazamientos anteriores fueron necesarios a causa, por ejemplo, del agotamiento de materias primas. Es claro que no fueron forzosos. No hay prueba de que el aluminio haya desplazado el acero debido a la escasez de la oferta de éste, como no la hay de que los detergentes hayan sustituido al jabón a causa de la falta de grasas saponificables. De hecho, Estados Unidos exporta en la actualidad más grasas animales que las requeridas para remplazar al consumo de detergentes por jabón. En otras palabras, los desplazamientos de productos que han causado la disminución de eficiencia del consumo energético industrial, son reversibles, por lo menos en principio, de manera que podrían lograrse ahorros en dicho consumo mediante la reversión de las tendencias que han imperado en el período de posguerra.

Aparte de tales desplazamientos, también resulta evidente que otra causa de declinación de la productividad de la energía en la industria estadounidense radica en el progreso de la automatización, gracias a la cual las máquinas, casi siempre movidas por electricidad, desplazan al trabajo manual. Así, la disminución drástica de la productividad de la energía en la industria del vestido se debe obviamente a un empleo mucho mayor de máquinas en lugar de mano de obra. En las estadísticas generales referentes a la industria de Estados Unidos se aprecia este fenómeno mediante la estrecha relación entre la baja de la productividad de la energía y el aumento de la productividad del trabajo. La gráfica 11 ilustra lo anterior y muestra la existencia de una relación lineal entre el valor agregado y el producto de las horas-hombre y los kilovatios-hora utilizados en la producción industrial. Esto significa que la productividad creciente del trabajo es proporcional al aumento de la cantidad consumida de electricidad, y que la disminución de la productividad de la energía eléctrica es proporcional a la baja de la cantidad de horas-hombre empleadas.

De nuevo es útil considerar la elasticidad y la reversibilidad del creciente consumo de energía que se relaciona con el desplazamiento del trabajo por maquinaria impulsada mediante electricidad. Es claro que semejante proceso de desplazamiento no fue impuesto por la reducida disponibilidad de trabajo y que, dejando aparte las considerables consecuencias económicas, las cuales se examinarán después, podría revertirse gracias al simple expediente de aumentar el trabajo manual en lugar de las operaciones impulsadas por electricidad.

De las consideraciones anteriores debería resultar claro que los antecedentes de la forma exponencial que tiene la curva del consumo energético en la industria estadounidense son muy complejos. Por supuesto, dicha curva responde a los aumentos de la producción total de la industria, pero otros factores desempeñan papeles igualmente importantes: el desplazamiento de empresas productivas ahorradoras de energía por otras consumidoras de ella y el desplazamiento general del trabajo humano por máquinas impulsadas mediante electricidad. Por decir lo menos, parece existir poca justificación para no considerar la interacción cambiante de estos últimos factores en cálculos del tipo empleado por Meadows *et al.*

CUADRO 2

Ahorros posibles de energía en el sector residencial

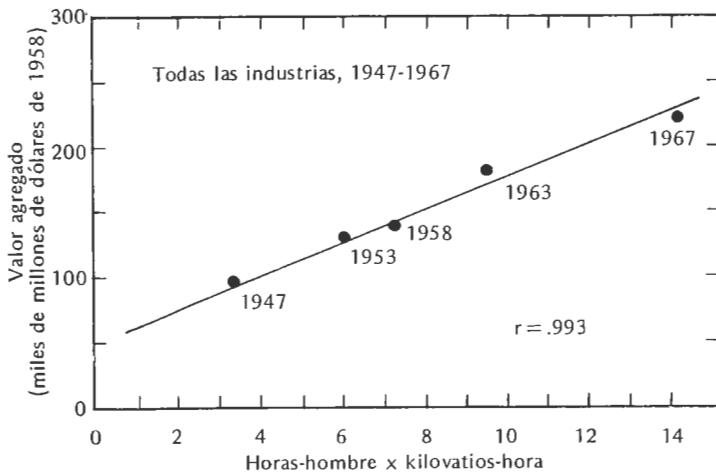
	Proporción de los hogares que tienen aparatos eléctricos*	Consumo total de energía eléctrica en 1968 (10 ¹² Btu)	Reducción porcentual posible	Método de ahorrar energía	Reducción en Btu (electricidad)
Refrigeradores	99.7	250	20	Eliminar los refrigeradores que no hacen hielo	501**
Calentadores de agua	26.1	223	100	Suprimir calentadores eléctricos	223
Calentadores	4.8	164	100	Eliminar calentadores eléctricos	164
Enfriadores de aire	36.7	154	44	Construir con la máxima eficacia	68**
Televisiones	99.0	128	0	Mejorar las instalaciones	0
Estufas eléctricas	47.0	96	100	Eliminar las estufas eléctricas	96
Congeladores de alimentos	27.2	80	16	Suprimir las variedades que no hacen hielo	13**
Secadores de ropa		51	100	Suprimir las variedades eléctricas	51
Otros		244	0		0
		<u>1 390</u>			<u>665</u>

* Datos del *Statistical Abstract* de Estados Unidos, 1969, p. 704, a menos que se indique otra cosa.

** Se trata de un caso en el que los ahorros de energía se obtuvieron mediante el empleo de unidades eléctricas más eficientes.

GRAFICA 11

Productividad decreciente de la energía y productividad creciente del trabajo en las manufacturas



Los datos del sector manufacturero muestran que la productividad de la energía y del trabajo han estado cambiando conforme al patrón siguiente: la creciente productividad del trabajo es proporcional al aumento de la cantidad de electricidad consumida; la disminución de la productividad de la electricidad es proporcional al decrecimiento del número de horas-hombre utilizadas.

¿Cuál es la elasticidad de la demanda de energía en el caso del consumo residencial? En el cuadro 2 se intenta en forma resumida una respuesta. Se proponen dos métodos para lograr ahorros de energía. Cuando existen en el mercado aparatos no eléctricos, como es el caso de los calentadores de agua, los aparatos de calefacción, las estufas y los secadores de ropa, el ahorro propuesto se logra gracias al sencillo procedimiento de eliminar

las variedades eléctricas. Esto tiene la ventaja adicional de ahorrar recursos energéticos; así, por ejemplo, la generación directa de calor mediante la utilización local de combustible para producir agua caliente, significa un gasto casi 44% menor de energéticos que el calentamiento por medio de electricidad. El segundo método ahorrador de energía del cuadro 2 consiste en mejorar la eficiencia de la utilización de energía. En el caso de los refrigeradores y congeladores, la eficiencia aumenta a costa de un inconveniente relativamente menor: la necesidad de descongelar el aparato cada cierto tiempo. Las variedades que enfrían sin producir hielo son muy ineficientes cuando se trata de utilizar la energía para refrigerar (los refrigeradores normales utilizan 32% menos de electricidad que los tipos mencionados antes), debido a que cierta cantidad de ella se utiliza para elevar la temperatura a fin de derretir el hielo.

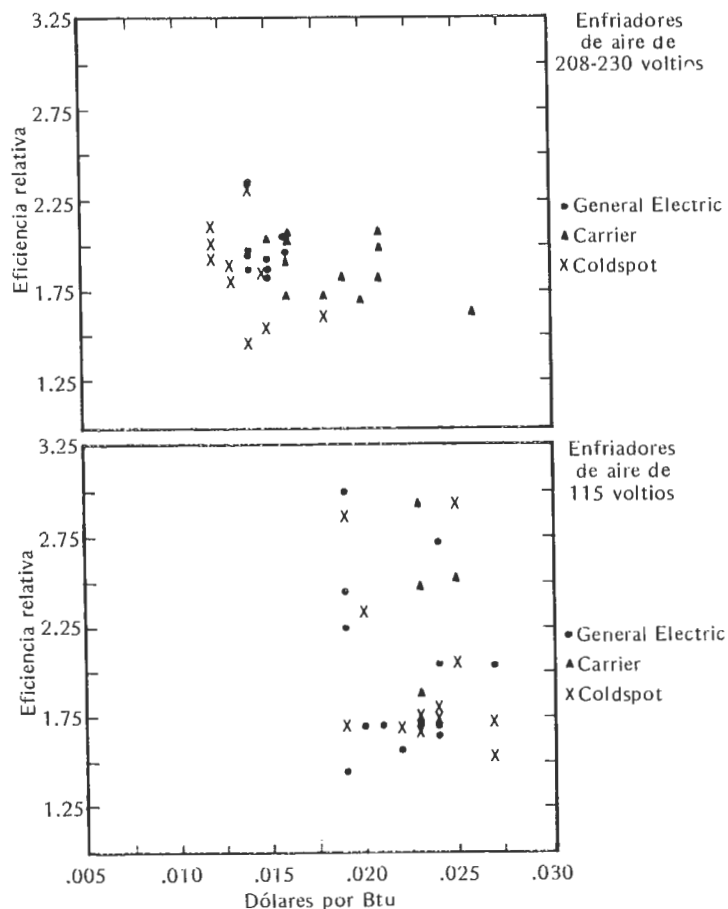
En un caso importante, el de los aparatos enfriadores de aire, es posible mejorar apreciablemente la eficiencia sin inconveniente alguno. En la gráfica 12 se reúnen todas las pruebas pertinentes. Los datos muestran la eficacia de enfriamiento de los diferentes modelos de tres marcas típicas, en relación con sus costos en dólares por Btu* de capacidad de enfriamiento. La eficiencia está representada por un índice que expresa el enfriamiento por unidad de electricidad utilizada. En la gráfica 12 se observan varias relaciones: a) existe considerable variación general en la eficiencia del enfriamiento del aire, desde un mínimo de 1.5 hasta un máximo de 3.0. Las variaciones son mayores en los aparatos de 115 voltios que en los de 230 voltios; estos últimos se agrupan en el rango aproximado de 2.0; b) en general, los aparatos de 230 voltios son menos eficientes, pero su precio original de compra es menor, por Btu de enfriamiento, que el de los aparatos de 115 voltios. En el seno de cada tipo de voltaje, no existe al parecer ninguna relación sistemática general entre el costo del enfriamiento de aire y la eficiencia. No obstante, conviene notar que en un aviso publici-

* British thermal units.

tario reciente de una unidad central de enfriamiento de aire se mencionan dos modelos: uno que se conceptúa de máxima eficiencia, aunque presumiblemente caro; otro, que se anuncia como económico en grado sumo, pero al parecer menos eficiente.

GRAFICA 12

Eficiencia relativa y costo por Btu de capacidad de enfriamiento de varios modelos de enfriadores de aire



Los símbolos indican tres marcas diferentes.

Fuentes de los datos básicos: Association of Home Appliance Manufacturers, 1971; *Directory of Certified Air Conditioners*, núm. 4, Chicago, octubre 15 de 1971 y Sr. Ken de la McFarland Corporation, comunicación personal.

Conforme a los datos de la gráfica 12 hay importantes oportunidades de ahorrar energía sin detrimento alguno del valor social, con sólo mejorar la eficiencia de los aparatos enfriadores de aire. Estimamos que el establecimiento de una norma para que todos los aparatos se diseñen de suerte que tengan la eficiencia máxima resultaría en un ahorro global de casi 36% en la energía consumida, sin provocar cambios en la

cantidad de aire frío producido. Probablemente el ahorro podría aumentarse a cerca de 44% mejorando el aislamiento de los edificios.

Tal como se indica en el cuadro 2, mediante esos procedimientos cabría reducir el consumo residencial de energía a cerca de la mitad de su valor actual. Buena parte de esta disminución se lograría mediante el aumento de la eficiencia de los aparatos enfriadores de aire, lo cual tiene particular importancia en vista de los efectos críticos que tiene la demanda de energía para fines de enfriamiento del aire en la oferta energética. Es obvio que los cambios propuestos elevarían la demanda interna de combustibles fósiles, especialmente de gas. Las consecuencias de tales cambios se examinan en seguida.

En un ensayo reciente de Richard G. Stein⁴ se analiza la elasticidad atribuible al consumo comercial de energía. El autor concluye que en el caso especial de los rascacielos modernos para oficinas, podrían lograrse ahorros de casi 50% en el consumo de energía mediante diseños apropiados (ventanas que se abran, calefacción y enfriamiento de aire eficientes, disminución de la iluminación excesiva). El cuadro 3 representa un esfuerzo tentativo para ampliar este análisis al caso del sector comercial en su conjunto. Quedan manifiestos en él posibles ahorros totales de casi 22% en la energía utilizada en el sector comercial, que equivalen aproximadamente a 4.8% del consumo total de energía en Estados Unidos. Nótese que estos ahorros no suponen pérdida alguna del valor social, excepto en lo que se refiere al empleo de energía para anuncios luminosos y exhibición comercial, propósitos que de cualquier forma son de dudosa valía para la sociedad.

En relación con el empleo comercial de la energía, resulta de particular interés el tema de la iluminación. La oferta total de iluminación eléctrica ha crecido de manera extremadamente rápida en Estados Unidos: entre 1948 y 1966 aumentó casi 5.5 veces. ¿Cuáles son las ventajas que se obtienen de estos aumentos? En la mayor parte de los casos la iluminación se concibe para apoyar actividades visuales; por tanto, es posible estimar la eficiencia de la iluminación mediante la relación entre el nivel de luz (que determina la cantidad de energía utilizada) y una medida de la función visual, la agudeza visual. El señor William M. C. Lam, de Cambridge, Massachusetts, arquitecto consultor en materia de iluminación, ha analizado la relación aludida. En un ensayo presentado en febrero de 1964 ante la Convención Nacional de la Asociación de Administradores de Escuelas de Estados Unidos,⁵ el arquitecto menciona el crecimiento de los niveles recomendados de iluminación de las escuelas: de 3 bujías-pie en 1910 hasta 18 bujías-pie entre 1910 y 1930, luego hasta 30 bujías-pie entre 1930 y 1950 y, a partir de ese año, hasta 70-150 bujías-pie. Demuestra cómo con la norma de 30 bujías-pie es posible lograr cerca de 93% de la agudeza visual máxima posible. Los niveles recomendados después de 1950, que significaron un aumento de la iluminación desde 30 bujías-pie hasta 70-150, sólo lograron aumentar entre

4 "Architecture and Energy", presentado en la reunión anual de la AAAS, celebrada en diciembre 29 de 1971 en Filadelfia. También presentado como "Power Consumption in Industry, Commerce, and the Home" ante el Grupo de Estudio de la Energía del Comité de Alteraciones Ambientales de la AAAS y el Grupo Especial de Energía Eléctrica del Scientists' Institute for Public Information, inédito.

5 "Paper on growth in recommended school light levels", febrero de 1964.

CUADRO 3

Ahorros posibles de energía en el sector comercial

Uso final	Energía eléctrica utilizada en 1968 (10 ¹² Btu)		Métodos	10 ¹² Btu		Energía adicional requerida 10 ¹² Btu
		%			%	
Insumos totales*	1 079	100.0		260	22.0	46.2
Calentamiento de agua*	84	7.8	Utilizar gas ^a	84	7.8	
Refrigeración*	244	22.6				
Enfriamiento de aire*	370	34.3	Reducir la iluminación 10%**	37	3.4	
Cocina*	8	0.7	Utilizar gas ^a	8	0.7	39.5
Otros*	373	34.6				6.7
Iluminación**	201	18.7	Reducirla 36%	75	7.8	
Iluminación publicitaria y de exhibición**	27	2.5	Eliminación total	27	2.5	
Elevadores**	40	3.7				
Ventiladores y equipos de aire**	35	3.3	Instalar ventanas que se abran**	7	0.6	
Bombas y motores**	18	1.7				
Varios**	52	4.7				

* Oficina de Ciencia y Tecnología, "Patterns of Energy Consumption in the United States", inédito, 1971.

** Richard G. Stein (1971).

^a Instituto Eléctrico Edison, de Nueva York, "Appliance Comparison References of Electric Energy Consumption with Fuel Use" EEI-9R-309.

3 y 4 por ciento la agudeza visual. Así, en aras de un mejoramiento despreciable de la agudeza visual, se ha aumentado muchas veces la energía utilizada para iluminación. En los años recientes esta tendencia se ha intensificado considerablemente. Es obvio que la iluminación anterior, sobre todo como se practica en los edificios comerciales, en las escuelas y en otros locales similares, deja margen para un considerable ahorro de energía.

En el cuadro 4 se resumen las posibilidades de ahorrar energía en los sectores industrial, residencial y comercial. Queda establecida la factibilidad de ahorros cercanos a 35%, sin costo alguno en términos de los bienes y servicios suministrados por la energía eléctrica. Estos datos no deben considerarse definitivos, sino verse como el resultado de un ejercicio tentativo en lo que respecta al ahorro energético. Sin embargo, el resultado es informativo y pone de relieve que existe una buena dosis de

elasticidad en la relación entre el consumo de energía eléctrica y la producción resultante de mercancías. En particular, los datos muestran cómo los cambios observados en esta relación durante la posguerra obedecen a influencias significativas de cambios concurrentes en la tecnología de la producción industrial, del diseño de los edificios residenciales y comerciales y del diseño de los aparatos eléctricos de uso doméstico. De nueva cuenta se nota la falta de una buena correspondencia entre la intensidad de la actividad productiva que degrada el ambiente y la demanda real de mercancías. Una vez más, esto plantea serias dudas respecto a los resultados obtenidos mediante cualquier modelo matemático en el cual se suponga, contrariando a la evidencia, que dicha correspondencia existe en realidad.

Los datos referentes al consumo de energía son particularmente ilustrativos en cuanto a la considerable complejidad interna tras la curva exponencial, en apariencia simple, que

CUADRO 4

Ahorros posibles en el consumo de electricidad en 1970

Sector	Millones de kilovatios-hora usados en 1970	Porcentaje respecto al total de Estados Unidos	Métodos	Ahorros		Porcentaje del consumo total de Estados Unidos
				Millones de kilovatios hora	Porcentaje del sector	
Industrial	720 000	47	Adoptar la tasa de productividad de la energía vigente en 1947	257 900	35.8	16.8
Comercial	309 900	20	Conforme a la estimación de Richard Stein	68 100	22.0	4.4
Residencial	442 000	29	Según lo calculado por Michael Corr	212 000	47.9	13.8
Total de Estados Unidos	1 531 600	100		537 800		35.0

describe la tendencia general del consumo de energía. Tal complejidad no sólo afecta la eficiencia con la cual se utiliza la energía eléctrica para producir bienes y por tanto la cantidad de degradación ambiental que de ello resulta, sino que también tiene efectos similares en las tasas de agotamiento de los recursos energéticos no renovables. Así, una razón del rápido agotamiento de las reservas de gas y petróleo en Estados Unidos radica en la disminución relativa del empleo de carbón, sobre todo en la actividad industrial. Una consecuencia secundaria se refiere al aumento en los hogares de las fuentes caloríficas a base de electricidad, con respecto a las fuentes que consumen combustibles de manera directa, proceso que ha reducido marcadamente la eficiencia general con la que se utiliza el combustible para fines de calefacción doméstica. Todas las relaciones anteriores quedan, por así decirlo, disimuladas por cualquier cálculo que acepte como dada la curva exponencial de producción de energía, sin preguntarse cuál es el *significado* de su forma.

Los ejemplos mencionados son típicos de un proceso general que resulta en gran medida responsable del agudo aumento de los niveles de contaminación en Estados Unidos durante la posguerra. En ese período ha habido un notable remplazo de materias naturales (algodón, lana, seda, madera) por materiales plásticos fabricados por el hombre; ha ocurrido un aumento notable de las cantidades y variedades de otros materiales sintéticos hechos por el hombre (por ejemplo, detergentes, plaguicidas, herbicidas); los motores de los automóviles se han rediseñado a fin de tener cada vez mayores índices de compresión; la energía eléctrica, generada en plantas enormes, sustituye cada vez más al empleo directo de combustible para calentar los hogares, procedimiento que se disemina geográficamente; ciertos materiales, tales como el aluminio y algunos productos químicos, cuya elaboración exige gran cantidad de energía, han remplazado cada vez más a otros de menores requerimientos energéticos; al mismo tiempo, han ocurrido alteraciones sorprendentes en las prácticas agrícolas, sobre todo la tendencia creciente a alimentar al ganado lejos de los pastizales, la disminución de las rotaciones de los cultivos, los grandes aumentos en el empleo de fertilizantes inorgánicos y la introducción masiva de plaguicidas y herbicidas sintéticos. Estos intensos cambios coinciden con la etapa de aumento de la contaminación y dan una importante clave respecto a la causa básica del deterioro ambiental en Estados Unidos. Dichos cambios provienen de la introducción masiva de nuevas tecnologías, en especial durante el período posterior a la segunda guerra mundial.

Las nuevas tecnologías resultan drásticamente inapropiadas para conciliarse con los procesos ambientales de la naturaleza. Por tanto, conducen a la contaminación ambiental. La manufactura de plásticos para sustituir a las fibras naturales significa el empleo de energía generada a base de combustibles, con sus efectos contaminantes, en lugar de energía solar absorbida por las plantas y transmitida mediante procesos naturales que no contaminan el ambiente. Los productos sintéticos elaborados por el hombre, tales como detergentes, plásticos y plaguicidas no pertenecen al sistema coordinado de los procesos bioquímicos que ha desarrollado la naturaleza viva; por tanto, son incompatibles con ese sistema, no son asimilados por los ciclos ambientales naturales y en consecuencia se acumulan como contaminantes. La creciente manufactura de productos químicos orgánicos sintéticos ha provocado mayor producción de

cloro, importante ingrediente de muchas síntesis orgánicas. A su vez, también se ha elevado el uso del mercurio en la producción electrolítica del cloro y éste es el origen de gran parte de la contaminación por mercurio en las aguas interiores de Estados Unidos. El desarrollo del motor de gasolina moderno de alta compresión, con la alta temperatura que le caracteriza, provoca que el oxígeno y el nitrógeno del aire se combinen y produzcan óxidos de nitrógeno (de otra manera raros en la naturaleza) los cuales no pueden eliminarse rápidamente mediante los procesos naturales del ambiente. Los óxidos de nitrógeno son la causa básica del neblino. El aumento de la generación de energía en grandes plantas eléctricas provoca la producción de varias sustancias importantes que no pueden ser eliminadas por los ciclos naturales y por tanto se convierten en contaminantes, en especial el bióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y, en el caso de las plantas nucleares, los radioisótopos. Las nuevas técnicas agrícolas han alterado los ciclos del suelo, de manera que la fertilidad natural de la tierra disminuye y los fertilizantes que contribuyen a la contaminación del agua llegan a las aguas superficiales. Los nuevos plaguicidas rompen el equilibrio entre los insectos y sus enemigos naturales y parásitos, con el resultado cada vez más frecuente de plagas inducidas por los insecticidas y la acumulación de éstos en la flora, la fauna y el hombre.

Estos cambios básicos de la producción industrial y agrícola, así como del transporte, son responsables de la mayor parte del aumento exponencial en los niveles de contaminación en Estados Unidos, a partir de 1945. La tendencia a desplazar tecnologías de efectos relativamente benignos en el ambiente, por otras nuevas que aumentan de manera aguda la proporción de contaminantes respecto a las mercancías producidas, es la "relación causal" que vincula las actividades productivas con el ambiente, mucho más que el crecimiento demográfico y el aumento del consumo *per capita*.

Las consideraciones anteriores provocan una pregunta persistente y crucial: ¿cómo es posible eliminar la tendencia notable de que las nuevas tecnologías sean más peligrosas para el ambiente que las antiguas a las cuales remplazan? Es éste un asunto complejo que he tratado con algún detalle en otra parte.⁶ Sin embargo, es preciso mencionar aquí uno de los factores pertinentes; se trata de la evidencia respecto a que la fuerza propulsora principal de la tendencia contra la ecología que caracteriza al desarrollo de tecnologías productivas modernas radica en que la producción está motivada generalmente por el deseo de obtener beneficios de corto plazo (en Estados Unidos esto deriva del sistema económico y de las utilidades privadas). Como resultado, los cambios de diseño, sea que se refieran a la producción industrial o agrícola, al transporte, a la construcción de edificios o a la de zonas urbanas completas, están regidos no por la compatibilidad ambiental, sino por los beneficios de corto plazo que prometen.

Así, de manera inevitable, tras los asuntos básicos de tipo científico y tecnológico que determinan la crisis ambiental están otros de carácter económico, social y político. Por supuesto, es precisamente en estos campos en los que deben incidir la opinión pública y la acción social, las cuales son, o deberían

⁶ Véase Barry Commoner, "The Environmental Cost of Economic Growth", en *Chemistry in Britain*, vol. 8, núm. 2, febrero de 1972, pp. 52-65.

ser, instrumentos de mejoramiento ambiental. En este punto resulta conveniente recordar que si bien los principios de la ciencia y la tecnología son suficientes para descubrir los beneficios sociales de un proceso productivo y los costos sociales de la degradación ambiental resultante, ningún principio de este tipo puede decirnos *dónde* lograr el equilibrio entre el costo y el beneficio. Por necesidad, esto es materia de juicio social. De ahí que cualquier método cuyo propósito sea enfrentarse a la crisis ambiental deba juzgarse no sólo por su exactitud técnica, sino también por su capacidad de *informar* a la sociedad y con ello ampliar las oportunidades de adoptar decisiones racionales y acciones eficaces.

En este aspecto son notables las diferencias entre los dos enfoques analíticos examinados en este trabajo. Tal como lo he demostrado con detalle en otra oportunidad y presentado en forma resumida párrafos atrás, el enfoque que propugno conduce a la conclusión general de que el desenvolvimiento exponencial del deterioro del ambiente se debe en gran medida a cambios concurrentes del carácter de las tecnologías productivas. Dichos cambios no obedecen por lo común al agotamiento de recursos, ni aumentan desde el punto de vista material el consumo *per capita*; por ello, desde ese punto de vista, son en gran parte reversibles o por lo menos susceptibles de modificarse considerablemente conforme a los requerimientos ambientales. Por otra parte, tal como se indicó antes, suele ser verdad que las tendencias antiecológicas mencionadas, características de la tecnología moderna, tienen motivaciones de tipo económico.

A guisa de ejemplo cabe reiterar que, conforme al análisis antedicho, se observa lo siguiente: *a)* que el aumento exponencial de la contaminación por nitrato de las aguas superficiales en el cinturón maicero de Estados Unidos es consecuencia directa del empleo intensificado de fertilizantes inorgánicos a base de nitrógeno; *b)* que el problema ambiental podría eliminarse, sin consecuencias desfavorables en los montos producidos, reduciendo aproximadamente 50% la tasa de aplicación de fertilizantes y restituyendo para fines de producción agrícola las superficies recientemente eliminadas; *c)* que los puntos anteriores requerirían cambios importantes en la economía agrícola, tales como la supresión de los subsidios a los agricultores para mantener tierras ociosas y la disminución de los rendimientos por acre y con ella la de los beneficios. Nótese que este enfoque revela sistemáticamente la cadena de causa y efecto que conduce desde el origen económico del problema hasta su consecuencia ambiental de contaminación por nitrato. Resulta útil poner al desnudo los aspectos económicos básicos a los que se debe hacer frente dadas las realidades de la acción social, si es que han de emprenderse actividades que aminoren la presión sobre el ambiente. En este sentido, el enfoque cumple no sólo su función técnica de análisis, sino también su función social de revelar en qué campos deben emprenderse las acciones sociales.

En contraste con esto, considérese el papel desempeñado por las raíces económicas de las cuestiones ambientales en el enfoque ejemplificado por el estudio de Meadows. En él se afirma explícitamente lo siguiente:

“El crecimiento real de la economía y la población dependerá de factores tales como la paz y la estabilidad social, la educación y el empleo, así como el sostenido progreso tecnológico. Estos factores son mucho más difíciles de evaluar o predecir. Ni este libro ni nuestro modelo mundial, en la etapa

actual de su desenvolvimiento, pueden tratar explícitamente estos factores sociales.”

Nótese que aparte de excluir varios factores sociales del análisis, tampoco se menciona siquiera un factor económico relativamente simple que parece desempeñar un papel general de importancia en el problema ambiental: la búsqueda de beneficios o ganancias de corto plazo. Además, en los casos en que se alude en el informe al sistema económico se supone que no tendrá cambios significativos:

“Reconozcamos, sin embargo, que las tasas de crecimiento enlistadas antes son producto de un complicado sistema económico y social esencialmente estable y sujeto, al parecer, a cambiar lenta más que rápidamente, excepto en casos de alteraciones graves.”

De esta suerte, como parte intrínseca del instrumento analítico que, como se indicó antes, gobierna de manera decisiva el resultado del análisis (es decir, la estructura del modelo matemático) está la *ausencia de importantes factores económicos y sociales*. Por tanto, los resultados del modelo no pueden, en principio, constituir una guía para comprender los efectos de los factores económicos en la crisis ambiental. Si la naturaleza de ésta es de tal género que requiere que la sociedad actúe sobre los parámetros económicos que gobiernan el proceso, entonces los resultados del análisis están de suyo incapacitados para guiar la acción social que conduzca al mejoramiento del ambiente. No obstante, como ya se indicó y como se hace cada vez más patente a juzgar por los conflictos que han generado las exigencias ambientales en la industria de Estados Unidos, casi todas las cuestiones relacionadas con el ambiente son de origen económico. De acuerdo con sus patrocinadores, *Los límites del crecimiento* está concebido como una guía de la acción social en lo que respecta a la crisis ambiental. Empero, es una guía que parece excluir automáticamente un camino principal: el de la modificación del sistema económico.

De esta suerte, un enfoque de la crisis ambiental tiende a exponer ante el público las raíces económicas de ella, de manera que queda abierta a la decisión social la posibilidad de enfrentarla mediante transformaciones económicas. En cambio, el otro enfoque impide esta opción.

En vista de estas consideraciones, me veo obligado a concluir este trabajo con un juicio de valor. En mi opinión, la comunidad científica y tecnológica debe proporcionar a la sociedad las informaciones necesarias para permitir la libre selección de diferentes soluciones a los problemas sociales que tengan contenido científico. La crisis ambiental es un señalado ejemplo de tales asuntos. Entre las posibles soluciones de la crisis, cada una de las cuales tiene graves consecuencias en materia de justicia social y libertad personal, están las acciones concebidas para regular el crecimiento demográfico y el aumento del consumo personal o para realizar los cambios económicos radicales que se requieren para imponer en los diseños tecnológicos el acatamiento fundamental del imperativo ecológico. Creo que quienes intentamos la difícil tarea de analizar la crisis ambiental tenemos dos obligaciones dominantes. La que se refiere a la ciencia es la de pugnar por un análisis preciso y significativo de la crisis. La que se refiere a la sociedad es la de aportar, en el curso de estos esfuerzos, el conocimiento de la gama total de acciones sociales que encierran la promesa de supervivencia.