

**ENTROPÍA Y
PROCESOS PRODUCTIVOS**
una aplicación a la economía ecuatoriana

María Caridad Araujo

Disertación de Grado

Facultad de Economía

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

QUITO, 1998

ENTROPÍA Y PROCESOS PRODUCTIVOS:
Una aplicación a la economía ecuatoriana
Maria Caridad Araujo

1a. Edición

Ediciones ABYA-YALA
12 de Octubre 14-30 y Wilson
Casilla: 17-12-719
Teléfono: 562-633 / 506-247
Fax: (593-2) 506-255
E-mail: admin-info@abyayala.org
editorial@abyayala.org.
Quito-Ecuador

Facultad de Economía
Pontificia Universidad Católica del
Ecuador
12 de Octubre y Carrión
Casilla: 17-01-2184
Fax: (593-2) 567-117
Telf: 529-270 / 529-260
Quito-Ecuador

Autoedición: Abya-Yala Editing
Quito - Ecuador

Impresión Docutech
Quito - Ecuador

ISBN: 9978-04-355-1

Impreso en Quito-Ecuador, 1998

Quiero agradecer a todos los amigos que han aportado con su entusiasmo y sus conocimientos para la elaboración de este trabajo: César Ajamil, Rosita Ferrín, Jorge Jurado, Salvador Marconi, Joseph Vogel y muy particularmente, a quien dirigió esta investigación, Mark Kenber

A mis papás, con muchísimo amor

INDICE

1. Introducción	9
2. Aplicaciones económicas de las leyes de la Termodinámica	13
A. Las leyes de la Termodinámica y el cuestionamiento al dogma mecanicista clásico.....	14
B. Entropía, irreversibilidad y procesos productivos	18
C. Sustentabilidad, energía y tamaño de la economía.....	25
D. Instrumentos económicos de análisis de los procesos productivos	31
i. La Teoría General del Ahorro de Exergía	32
ii. La Huella Ecológica.....	36
iii. La Matriz Insumo-Producto	40
E. Presentación del Análisis Empírico	42
3. Análisis económico y termodinámico de dos alternativas energéticas para el sistema de transporte del Distrito Metropolitano	49
A. Aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía ..49	
i. Supuestos y metodología	49
ii. Desarrollo empírico	53
iii. Análisis de los resultados	60
B. Aplicación de la Huella Ecológica	65
i. Supuestos y metodología	65
ii. Desarrollo empírico	68
iii. Análisis de los resultados	76

4. Lectura de los coeficientes técnicos de la Matriz Insumo-Producto a partir de una aplicación económica de la ley de la entropía	83
A. Análisis empírico	83
i. Energía, ¿para qué?	84
ii. Trayectoria de la (in)eficiencia en el consumo de energía	87
iii. Análisis de los resultados	91
iv. Comparación con los resultados del ejercicio microeconómico.....	96
v. Incentivos para la eficiencia, cambio tecnológico y tiempo	98
vi. La estructura del consumo energético: un espejo de las economías	101
B. Reflexiones teóricas.....	107
i. Producción que no se transa en el mercado.....	108
ii. Productividad del capital natural.....	112
5. Conclusiones	117
A. Alcance del trabajo empírico.....	119
B. Nuevas interpretaciones de los mismos términos.....	124
C. Una cuestión de información y creatividad.....	132
Bibliografía	135
Anexos.....	139

LISTA DE CUADROS

	Página
Gráfico 1: Forma del Proceso Económico.....	21
Cuadro 1: Variables de la Teoría General del Ahorro de Exergía...	52
Cuadro 2: Información sobre los Sistemas de Transporte.....	53
Cuadro 3: Resultados de la Aplicación de la TGAE	59
Cuadro 4: Déficit Ecológico de los Países Industrializados.....	69
Cuadro 5: Espacio Disponible per Cápita	72
Cuadro 6: Variables de la Huella Ecológica.....	73
Cuadro 7: Superficie Mensual Apropiada por cada Usuario del Sistema de Transporte	75
Cuadro 8: Huella Ecológica Promedio de la Población que Usa el Sistema de Transporte Público	75
Cuadro 9: Estructura del Consumo de los Productos Energéticos	85
Cuadro 10: Participación en el Consumo de los Principales Usuarios de Productos Energéticos	92
Cuadro 11: Evolución de la Productividad	94
Cuadro 12: Comparación de Resultados	97
Cuadro 13: Participación de las Ramas Productivas en el Consumo de Energía	103
Cuadro 14: Comparación de Coeficientes Técnicos	105
Anexo 1: Principales Ramas que Consumen Productos Energéticos	139
Anexo 2: Evolución de los Coeficientes Técnicos	141

1. INTRODUCCIÓN

La satisfacción de las necesidades materiales de la humanidad es una tarea difícil pues exige adoptar decisiones acerca de la asignación de recursos finitos en esta y las próximas generaciones. El acelerado crecimiento de la población mundial, durante el último siglo, plantea un desafío adicional: utilizar con eficiencia los recursos de un planeta que parecería estar a punto de alcanzar su máxima capacidad de sustentación. La ciencia económica no puede quedar al margen de esta realidad. Por el contrario, necesita desarrollar instrumentos que permitan evaluar, con objetividad, las decisiones intertemporales de asignación.

En este sentido, la Economía Ecológica ha avanzado algunas propuestas. Parte de una nueva concepción del circuito económico; en ella, éste deja de ser un flujo circular aislado y se transforma en una trayectoria lineal y unidireccional, estrechamente vinculada al entorno. El sustento teórico de este enfoque son las leyes de la Termodinámica, postulados que, durante el siglo pasado, provocaron una profunda revolución epistemológica de las ciencias físicas.

Desde el punto de vista teórico, la aplicación de las leyes de la Termodinámica al análisis económico abre una serie de posibilidades de reflexión y permite enriquecer las definiciones tradicionales con elementos cualitativos importantes. Además, ofrece nuevas categorías de análisis para evaluar los procesos productivos e interpretar la racionalidad de la producción.

Aún cuando existen numerosos aportes de autores de diferentes regiones del mundo en torno a la reflexión sobre las aplicaciones económicas de las leyes de la Termodinámica, queda todavía un largo camino por explorar, sobre todo en torno a aspectos relacionados con las aplicaciones prácticas y los instrumentos empíricos que permitan abordar problemas concretos relacionados con la sustentabilidad de las actividades humanas.

Este trabajo es una muestra de cómo el análisis económico se enriquece gracias a la incorporación de elementos termodinámicos, en el ámbito teórico y práctico. A lo largo de toda la investigación, esa ha sido la referencia presente en las aplicaciones microeconómicas y en las macroeconómicas. La metodología utilizada posee la ventaja de integrar, en una misma línea de análisis, elementos del estudio de los procesos productivos que, en la mayor parte de las ocasiones, se abordan por separado. Es decir, logra aproximarse tanto a un problema de naturaleza micro, como a otro macroeconómico, desde una visión que supera los límites analíticos impuestos por los mercados.

En la primera parte del trabajo, se presenta el marco teórico que propone una lectura de los procesos de transformación material (producción), a partir de las leyes de la Termodinámica. La segunda parte contiene dos ejercicios empíricos. El primero, de naturaleza microeconómica, evalúa dos alternativas de transporte para la ciudad de Quito. En este punto, se aplican instrumentos que integran el análisis termodinámico y el económico. El segundo ejercicio empírico estudia la evolución de los coeficientes técnicos de la Matriz Insumo-Producto de las Cuentas Nacionales del Ecuador. A partir de ellos, se inducen algunos resultados sobre la eficiencia del uso de energía en la economía ecuatoriana y los incentivos que pueden conducir hacia este objetivo. En la última parte del trabajo, se exponen conclusiones sobre los ejercicios empíricos y se recomiendan nuevas aplica-

ciones de la investigación para el diseño de política y su empleo para estudios futuros.

El principal esfuerzo del análisis de esta investigación ha sido abordar dos ejercicios empíricos, desde un enfoque que permite comprender los procesos productivos de una manera distinta. En este sentido, el trabajo muestra una lectura alternativa de la economía a partir de una perspectiva global, que no la aísla del entorno físico que abastece la vida, aún cuando exige todavía un vasto desarrollo teórico y práctico. Pero la investigación también ilustra las ventajas de emprender este trabajo. No se trata de jubilar a la ciencia económica, ni de desarrollar ejercicios intelectuales complejos e inútiles. Las ideas que se exponen en las secciones siguientes intentan comprender mejor los procesos humanos de transformación del entorno, esenciales para la supervivencia de la especie. Sin lugar a dudas, esta tarea constituye un desafío y una necesidad urgente del mundo de fines del siglo XX.

2. APLICACIONES ECONÓMICAS DE LAS LEYES DE LA TERMODINÁMICA

En el último siglo, las ciencias físicas y biológicas han experimentado un vertiginoso desarrollo y han dado pasos enormes que las han conducido a plantear cambios fundamentales en su forma de aproximación al conocimiento. Muy pocos de estos cambios han sido incorporados al análisis de las ciencias sociales y, en particular, de la ciencia económica. La Economía Ecológica surge ante la incapacidad de la Economía convencional de dar respuesta a los problemas relacionados con el aprovisionamiento material de los seres humanos (la “administración del hogar” u oikos nomos, según el origen griego del término economía).

La Economía Ecológica combina la crematística o estudio de los precios, con elementos fundamentales de los procesos humanos de reproducción. En términos del análisis económico, uno de sus planteamientos más importantes es la incorporación de las leyes de la Termodinámica al estudio de los procesos productivos. Autores de la Economía Ecológica, como el español Joan Martínez Alier (1991: 11), plantean que la diferencia entre la crematística y la Economía consiste en que la primera se limita al estudio de las transacciones de mercado, mientras que la segunda se concentra en el “uso de energía y materiales en ecosistemas donde viven hombres y mujeres”¹.

Para introducir este tipo de criterios en el análisis económico, se necesita desarrollar instrumentos teóricos nuevos que

permitan, con cierto grado de abstracción, reproducir los efectos de los fenómenos físicos en la economía.

En el presente capítulo, se desarrollan algunas reflexiones teóricas sobre las aplicaciones económicas de las leyes de la Termodinámica. En una primera sección, se presentan estas leyes en el contexto histórico en que fueron formuladas; se incluye también una reflexión sobre el cambio epistemológico que las leyes de la Termodinámica provocaron en las ciencias físicas y se propone una lectura de este cambio, desde la óptica de las ciencias sociales. En la segunda parte del capítulo, se profundiza en las implicaciones de la ley de la entropía sobre la irreversibilidad de los procesos productivos. Además, se expone un debate teórico sobre la “forma” (circular o lineal) del proceso económico y su razón de ser. En una tercera sección, al análisis anterior se incorpora el debate acerca de sustentabilidad y capacidad de carga del planeta, dentro del contexto del estudio de los flujos de energía. Finalmente, en la cuarta parte, se describen los instrumentos que se emplearán en el análisis empírico: la Teoría General del Ahorro de Exergía, la Huella Ecológica y la Matriz Insumo-Producto.

A. Las leyes de la Termodinámica y el cuestionamiento al dogma mecanicista clásico

“De un modo distinto al del pasado, el hombre tendrá que volver a la idea de que su existencia es un don gratuito del sol”
(Georgescu-Roegen, 1996: 68)

Las leyes de la Termodinámica provocaron una transformación profunda en la epistemología de las ciencias físicas pues propusieron cambios teóricos fundamentales. A continuación, se presentan los planteamientos de las leyes de la Termodinámica y algunos elementos de análisis acerca de los cambios propuestos.

En 1824, Sadi Carnot² escribió un ensayo sobre la eficiencia de las máquinas de vapor, en el que reconoció que el calor se mueve siempre en una sola dirección: de los cuerpos más calientes hacia los menos cálidos. Hasta ese momento, las leyes de la mecánica no admitían que el movimiento de una partícula pudiese ser unidireccional. Esta observación constituyó una revolución profunda para las ciencias físicas³. A tal punto, que se creó una nueva rama de la Física, la Termodinámica, para estudiar estos fenómenos (Georgescu-Roegen, 1996: 183).

Descubrimientos posteriores demostraron que todas las formas conocidas de energía se mueven también en un sentido único: de un nivel superior a otro inferior. En 1865, Rudolf Clausius⁴ enunció las dos leyes de la Termodinámica: 1) la materia y la energía no se crean ni se destruyen, tan solo cambian de estado o de lugar; 2) el grado de desorden de un sistema aislado, su entropía, siempre incrementa⁵.

A pesar de que, como se mencionó anteriormente, las leyes de la Termodinámica se oponen a las leyes de la mecánica, no las invalidan. De ahí que las ciencias físicas abandonaran, hace más de ciento cincuenta años, la idea de que la mecánica constituye la única vía que conduce al conocimiento. Desde el punto de vista epistemológico, este descubrimiento sentó las bases para un cuestionamiento profundo del pensamiento racional.

El término entropía tiene su origen en la palabra griega “tropos”, que significa cambio o evolución. La segunda ley de la Termodinámica “es una ley evolutiva, con un vector temporal claramente definido: la entropía” (Georgescu-Roegen, 1996: 193). Sin embargo, este vector, a diferencia de lo que sucede en las leyes temporales de la Física pura, no es “la enunciación de un paralelismo temporal entre dos fenómenos mecánicos, uno de los cuales es (necesariamente) un reloj mecánico” (Georgescu-Roegen, 1996: 191).

La ley de la entropía no está ligada al tiempo como fenómeno mecánico y, por el contrario, constituye una evidencia de que las leyes de la mecánica no determinan todas las formas de existencia en la naturaleza. La ley de la entropía afirma únicamente que, en el siguiente minuto, la entropía total del universo será mayor, en términos cualitativos. Sin embargo, no permite conocer la magnitud de este cambio en términos cuantitativos (Georgescu-Roegen, 1996: 195). Desde la óptica del presente estudio, la eficiencia en el uso de la energía está directamente relacionada con la reducción de la magnitud del deterioro entrópico de los procesos, tema que será tratado con profundidad más adelante.

El enfoque termodinámico incorpora dos cualidades que, generalmente, están ausentes en el análisis económico: la temporalidad y la mensurabilidad. Lo temporal aparece cuando se plantea la degradación de la energía como un fenómeno irreversible. Lo mensurable se refiere a la posibilidad de cuantificar los cambios en la energía y los flujos materiales que resultan de los procesos de transformación material (Vogel, 1989: 192).

Autores como Georgescu-Roegen (1996:147-166) afirman que el cambio epistemológico en las ciencias físicas, provocado por la formulación de las leyes de la Termodinámica, deja varias lecciones a las ciencias sociales. En primer lugar, plantea la imposibilidad de establecer un fundamento lógico no contradictorio para todas las propiedades de la materia (como el caso del movimiento unidireccional del calor, descrito anteriormente)⁶.

Segundo, Georgescu-Roegen propone que, aunque el ser humano ha desarrollado miles de instrumentos para medir cantidades, no todas las mediciones pueden reducirse a lectores puntuales. En este sentido, los economistas no han logrado superar el error de usar instrumentos cardinales -que implican la adición y la sustracción indiferentes en un sentido físico- para

describir atributos que son variables ordinales (como el bienestar de la población que se intenta medir con el producto interno bruto). No es suficiente expresar la producción destinada al consumo humano en unidades físicas (materiales o energéticas) si no se la explica a través de otras variables cualitativas, como las condiciones psicológicas y sociales del grupo humano (Martínez Alier, 1991: 121).

Tercero, puesto que la cuantificación de los atributos no hace que desaparezca su cualidad, para lograr una descripción adecuada de un fenómeno “queda un residuo cualitativo que forzosamente debe trasladarse a la fórmula numérica con la que se describe el fenómeno”. Como es imposible lograr la introducción de tal residuo, ninguna ciencia puede prescindir de las categorías “cantidad” y “calidad”. Precisamente, la ley de la entropía es un instrumento que permite evaluar la calidad de los procesos económicos.

Un cuarto argumento a favor de una revisión de la interpretación mecanicista del proceso económico es que este enfoque considera que los recursos de la naturaleza son bienes libres, cuya extracción está exenta de costos. Como parte de un proceso mecánico e ilimitado, se considera que la naturaleza proporciona sus recursos y absorbe los residuos generados por las actividades humanas en forma gratuita⁷. La definición del capital proporcionada por Alfred Marshall ilustra este argumento. El capital es “todo aquello que rinde un ingreso, con excepción de la tierra... incluyendo en la definición de tierra todos los regalos gratuitos de la naturaleza como las minas, las pesquerías, etc. que rinden un ingreso”⁸ (Marshall 1961, en Hinterberg *et. al.* 1995: 8).

No son nuevas estas críticas a la excesiva mecanización y omisión de categorías cualitativas en la teoría económica. En 1883, el escocés Patrick Geddes (1854-1932) escribió a León

Walras una carta en la que ironizaba las simplificaciones que propone la Economía matemática, que se cree capaz de “¡... hacer cualquier cosa en los estudios de la producción material sin la ayuda de la Física aplicada, sin la de la biología,... sin la de la sociología moderna... o sin la de las investigaciones realizadas por la escuela histórica o antropológica!” (Martínez Alier, 1991: 115).

B. Entropía, irreversibilidad y procesos productivos

La Termodinámica surge del análisis de la eficiencia de los procesos mecánicos y esto precisamente la convierte en la más económica de las leyes físicas. En este sentido, la visión antropocéntrica de los fenómenos físicos que supone el estudio de la eficiencia coincide con la óptica del análisis económico.

A partir del estudio de las leyes de la Termodinámica, fue posible identificar dos cualidades de la energía. La primera consiste en que la energía libre (disponible) es aquella que puede transformarse en trabajo mecánico. La segunda cualidad se refiere a la energía disipada (latente), que es la energía libre disipada siempre por sí misma y sin pérdida alguna. No toda energía interna de un sistema puede ser transformada en otro tipo de energía utilizable. La verdadera capacidad de un sistema de producir trabajo (su energía libre) se conoce también como exergía.

Estas y otras características de la energía son fundamentales en el análisis aquí propuesto. Al plantearse el hecho de que todo desplazamiento material acelera el cambio ecológico –sea o no este desplazamiento parte del proceso económico– surge la necesidad de comprender el funcionamiento de la producción desde una óptica más global (Hinterberg *et. al.*, 1995: 6). Esta sección busca profundizar en algunos aspectos cualitativos relacionados con la ley de la entropía, como la irreversibilidad de la degradación entrópica y su enfrentamiento constante con la

conservación de la vida. También se presenta una reflexión sobre las definiciones tradicionales de crecimiento económico y producción, a la luz de las teorías que aquí se discuten.

La segunda ley de la Termodinámica sostiene que el universo está sujeto a una degradación entrópica irrevocable e irreversible⁹ puesto que “una vez transformada en energía latente, la energía libre no puede recuperarse jamás” (Georgescu-Roegen, 1996: 258; Valero, Ranz y Subiela, 1996: 2).

Este postulado, que sugiere el fin entrópico del universo, ha sido cuestionado por algunos economistas ecológicos como Norgaard y Swaney (Martínez Alier, 1991: 149). Ellos proponen que la ley de la evolución contradice a la de la entropía; sostienen que las fuentes de la vida, a lo largo de la historia, han aumentado en forma espontánea a través de la lucha por lograr una mejor adaptación a las condiciones ambientales. De estas reflexiones, surge la idea de que la vida enfrenta, permanentemente, una lucha contra la entropía.

Y es ahí donde se vislumbra la esencia de la relación entre la Termodinámica y la Economía: en el hecho de que la Economía es una ciencia de naturaleza antropocéntrica y persigue la conservación de la especie humana. Cada “organismo vivo es una empresa permanente que mantiene su estructura altamente ordenada al absorber baja entropía del entorno, de modo que se compense la degradación entrópica a la que se encuentra continuamente sometido” y, por tanto, “la vida no se alimenta de mera materia y de mera energía sino... de baja entropía”. De ahí que la intencionalidad de todas las estructuras vivientes es mantener intacta su entropía y, para satisfacer esa intencionalidad, consumen baja entropía del entorno. Por esta razón, la vida acelera la degradación entrópica del sistema (en este caso del planeta Tierra) en su conjunto (Georgescu-Roegen, 1996: 252, 255-256).

En 1880, el ucraniano Serhii Podolinski adelantó la idea de que la humanidad es una máquina perfecta que “no solamente convierte calor y otras fuerzas físicas en trabajo, sino que también consigue realizar el ciclo inverso, o sea, transformar el trabajo en calor y en otras fuerzas físicas necesarias para satisfacer nuestras necesidades”. A partir de este principio, conocido como el principio de Podolinski, se sostiene que “para que la humanidad asegure sus condiciones de existencia,... la productividad energética del trabajo humano debe ser igual o mayor que... la eficacia del cuerpo humano para transformar calor en trabajo” (Martínez Alier, 1995: 71).

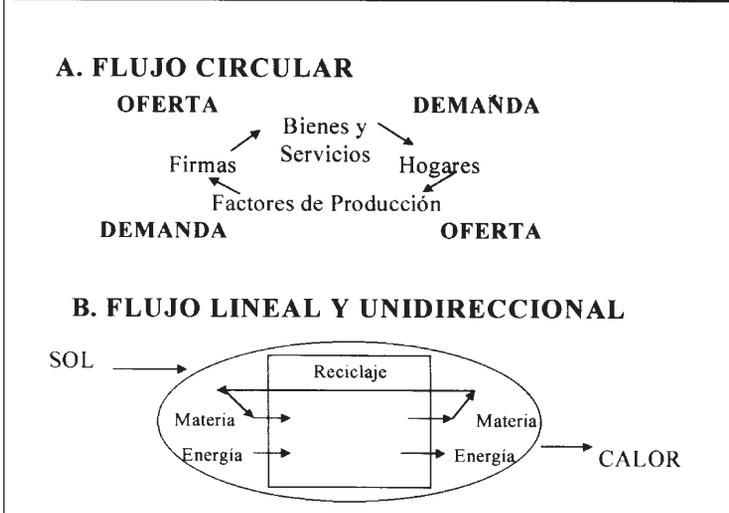
Los procesos¹⁰ productivos son ejes del estudio de la ciencia económica e intentan representarse en la función de producción. Expresan la adición de diferentes procesos físicos relacionados con las operaciones necesarias para transformar en producto la materia prima. La Economía, tradicionalmente, ha trazado los límites de los procesos en la circulación de mercancías. Por ello, han quedado marginados o “fuera de mercado” una serie de procesos físicos adicionales que surgen a partir de la actividad productiva (Georgescu-Roegen, 1996: 162, 275-278).

Todo proceso se encuentra directamente relacionado con cambios cualitativos. Los obreros entran al proceso productivo descansados y salen cansados. Las herramientas ingresan a este proceso nuevas y, con él, se envejecen. El desgaste, producto de la entropía, es un modo de describir un proceso sin dejar fuera ningún factor esencial (Georgescu-Roegen, 1996: 162, 281, 283).

De la aplicación de las leyes de la Termodinámica en los procesos productivos, se observa que “la producción significa un déficit en términos de entropía” pues supone un agotamiento irrevocable de una cantidad de baja entropía mayor que la diferencia existente entre la entropía del producto acabado y la de la materia prima”. De acuerdo a este análisis, es posible intentar ex-

plicar el valor económico de varias cualidades de los bienes. La tierra es valiosa puesto que, a través de la fotosíntesis que realizan las plantas, es la única red de captación de entropía. A esto se agrega que la extensión de tierra del planeta tiene un tamaño dado. En otros bienes, su valor proviene de la incapacidad de reutilizar esa cantidad de baja entropía puesto que ésta aumenta irrevocablemente¹¹ (Georgescu-Roegen, 1996:348-350).

Gráfico 1: FORMA DEL PROCESO ECONÓMICO



Fuente: Goodland, 1995: 35.

Del análisis anterior se concluye que el proceso económico no es circular, como tradicionalmente se ha ilustrado en la Economía. Por el contrario, se trata de un proceso unidireccional que consiste en una transformación continua de baja entropía en alta entropía. El Gráfico 1 permite ilustrar las diferencias con mayor claridad.

El proceso económico entrópico y el proceso físico entrópico no son iguales. El primero depende de la actividad humana mientras que el segundo es automático. A esto se añade que el proceso económico entrópico es más eficiente en términos de producción de desechos pues se genera por un proceso adicional de selección artificial (Georgescu-Roegen, 1996:353).

Por esta razón, para Patrick Geddes, el concepto de producto final no puede considerarse equivalente al de valor agregado, como tradicionalmente se hace en la Economía. Geddes define el producto final como “el valor sobrante de la energía y materia disponibles”, una vez que se ha pasado por todas las etapas del proceso productivo (Martínez Alier, 1991: 121).

En este punto, es necesario explicar la verdadera razón de ser del proceso económico pues, en un principio, su resultado es la aceleración del desorden del sistema. La Economía responde esta inquietud afirmando que “el verdadero flujo del sistema económico no es un flujo material sino uno síquico: el placer de vivir, que tiene una intensidad en cada tiempo pero no se puede acumular en un stock” (Georgescu-Roegen, 1996:355).

Antonio Valero (1993: 57), que ha intentado una definición de utilidad desde el punto de vista de la Física, se refiere a la utilidad termodinámica, la misma que siempre se expresa con relación a un referente y está contabilizada en unidades energéticas de una determinada calidad (por la segunda ley de la Termodinámica, es importante distinguir entre las diferentes calidades de energía). Desde un punto de vista antropocéntrico, la utilidad termodinámica es un equivalente del concepto de energía disponible o exergía.

En el estudio de los flujos energéticos que sostienen la vida, se distinguen dos tipos de evolución en los procesos. La evolución endosomática es el progreso de la eficiencia entrópica de

las estructuras portadoras de vida, es decir, la capacidad de consumir menos energía para cumplir las funciones vitales. Por su parte, la evolución exosomática es el progreso de la eficiencia entrópica de los instrumentos y del equipo de capital que emplean los organismos vivos y que les permite reducir su consumo endosomático de energía libre.

Valiéndose de instrumentos de la teoría económica, es posible afirmar que “la elasticidad ingreso del consumo endosomático de energía es baja (incluso es cero, en niveles altos de ingreso) y... la elasticidad ingreso de su consumo exosomático es alta” (cercana a la unidad, Martínez Alier, 1991: 167). Para autores como Georgescu-Roegen, el origen del conflicto social en todas las épocas de la historia humana se encuentra en la lucha por la entropía y por la posesión de instrumentos exosomáticos¹² (1996: 380-390).

A partir de las reflexiones anteriores, se puede definir el proceso de crecimiento de una economía como el paso de un estado estacionario a otro. Se entiende por estado estacionario a aquel que puede repetirse indefinidamente. Por tanto, para que se dé un proceso de crecimiento, el capital debe mantenerse “como fondo constante por el mismo proceso en que participa”. De esta manera, el objetivo de crecimiento es que la eficiencia específica de cada componente del capital se mantenga constante (Georgescu-Roegen, 1996: 293-295).

A partir de esta definición, cabe proponer que el desarrollo económico implica la existencia de dos elementos: 1) el desarrollo o disminución de la proporción de baja entropía que se convierte en desechos y 2) el crecimiento puro o la expansión del proceso de desarrollo más eficiente.

El desarrollo se traduciría, entonces, en una mejora de la eficiencia general del sistema productivo que sólo se puede lo-

grar al aprender el funcionamiento de los mecanismos de producción. Un elemento clave para alcanzar esta mejora de eficiencia es la recuperación máxima de energía utilizable de los desechos o reciclado (Valero, 1993: 61-62).

El desarrollo se podrá dar en la medida en que se optimice el aprovechamiento de las dos fuentes generadoras de riqueza de la humanidad: el stock finito de recursos minerales (que se puede desacumular a un flujo voluntario) y el flujo de radiación solar (cuyo ritmo no está sujeto al control humano) (Georgescu-Roegen, 1996: 366, 376-377).

El premio Nobel de Química, Frederick Soddy (1877-1956), en sus conferencias de “Economía Cartesiana” dictadas en 1921, discrepó con las definiciones dadas a ciertos términos por la Economía convencional. Para Soddy, el capital sólo puede gastarse; proviene del flujo de la energía solar y no es posible almacenarlo porque está sujeto a una ley de continuo decrecimiento, la entropía. En este sentido, la mayor parte de las inversiones financieras “no incrementan la capacidad productiva en un sentido físico, sino que más bien aumentan la destrucción de los recursos no renovables” (Martínez Alier, 1991: 147-149).

Soddy estableció las pautas para muchos análisis posteriores en la Economía Ambiental al proponer que “una alta tasa de pago por ahorros sólo podría ser pagada si éstos se convertían en inversiones de alto rendimiento, es decir, si había una alta tasa de crecimiento en la economía y, por tanto, una alta tasa de destrucción de recursos no renovables, esto es, si el valor actual de la demanda futura de recursos agotables es drásticamente rebajado” (Martínez Alier, 1991: 157-159, 162).

Como se observa en los párrafos anteriores, es posible encontrar un sinnúmero de aplicaciones económicas a las leyes de la Termodinámica, las mismas que se prestan para profundizar el

análisis en varias direcciones. En líneas generales, la ley de la entropía introduce algunos elementos en el pensamiento económico convencional, los mismos que se resumen a continuación (Rees y Wackernagel, 1996: 43). En primer lugar, todo sistema no aislado (como la economía o el cuerpo humano) está sujeto a las mismas fuerzas de deterioro entrópico que los cuerpos aislados. Por tanto, para mantener su orden e integridad internos, debe permanentemente importar energía y material de baja entropía del entorno y exportar energía y materia de alta entropía hacia el entorno. Esto sucede en un flujo unidireccional e irreversible.

En segundo lugar, todos los sistemas complejos, altamente ordenados y no estacionarios, crecen necesariamente y se desarrollan (o incrementan su orden interno) aumentando el desorden de niveles más altos en el sistema jerárquico. La economía humana es uno de estos sistemas complejos. También es un subsistema de una ecósfera materialmente cerrada que no crece. Por tanto, depende para su manutención, crecimiento y desarrollo, de la producción de energía y materia de baja entropía y de la capacidad de asimilación de desechos de la ecósfera.

De los principios enunciados anteriormente, se deriva que el crecimiento continuo de la economía puede lograrse solamente a costa de un incremento de la entropía (desorden) de la ecósfera. Esto ocurre cuando el consumo en la economía excede la producción natural de energía. En la práctica, se manifiesta a través del deterioro acelerado del capital natural, la reducción de la biodiversidad, la contaminación del aire, la tierra y el agua, los cambios atmosféricos, y otros problemas ambientales.

C. Sustentabilidad, energía y tamaño de la economía

“Cuando Chile exporta por ejemplo pedazos de madera a la rápida velocidad actual, también exporta la base productiva del sector forestal: biodiversidad, cursos de agua, nutrientes de la tierra. Cuan-

do Chile exporta minerales, también exporta el agua escasa del desierto del norte. Cuando Chile exporta peces y salmón, también exporta su equilibrio ecológico, necesario para mantener el desarrollo de su productividad futura. Cuando Chile exporta uvas y kiwis de monocultivo, también exporta la fertilidad de sus tierras, e incluso más, intercambia una variedad de cultivos tradicionales de consumo nacional y la salud de sus trabajadores en esos sectores” (Van Hauwermeiren y De Wel, 1995: 8).

Cuatro siglos antes de Cristo, en las Leyes de Platón, se escribió una reflexión sobre la capacidad de la tierra de sostener la población humana. Platón aseveró que el espacio “... apropiado total para el número de ciudadanos no puede fijarse sin considerar la tierra y los estados vecinos. La tierra debe ser lo suficientemente extensa para soportar un número dado de personas con una comodidad austera...” (citado por Rees y Wackernagel, 1996: 48).

En 1758, François Quesnay publicó su *Tableau Economique*, la misma que constituyó un gran aporte a la Contabilidad Nacional en sus orígenes. Esta tabla introdujo el análisis de la relación entre la productividad de la tierra y la creación de riqueza, con lo cual fue uno de los primeros instrumentos de contabilidad ecológica y la base del análisis de la capacidad de carga. Veinte años más tarde, Thomas Malthus inició el debate sobre la capacidad limitada de la tierra para sostener la vida de una población que crecía a un ritmo acelerado (Rees y Wackernagel, 1996: 48-49).

En 1902, el físico Leopold Pfaunder (1839-1920) planteó la necesidad de estudiar la capacidad sustentadora de la Tierra y la posibilidad de que ésta aumentara mediante la intensificación de la economía. Para Pfaunder, esta capacidad dependía de la disponibilidad de material necesario para la vida y de los costos energéticos de transportar material desde otras regiones (Martínez Alier, 1991: 129).

Como se explica en los párrafos anteriores, el tema de la capacidad sustentadora de la Tierra ha sido abordado desde enfoques diversos¹³. Esta sección busca integrar las ideas antes presentadas con algunos elementos de la discusión sobre sustentabilidad que, actualmente, mantienen varios autores. Con este fin, se presenta una reflexión sobre la capacidad de sustentación del planeta Tierra y los flujos de intercambio comercial entre países.

La Tierra como sistema se encuentra sometida a dos flujos energéticos principales. El primero proviene de la radiación solar. Cada segundo la Tierra recibe 1.353 joules de energía solar en cada metro cuadrado¹⁴. El segundo flujo de energía proviene del interior del planeta y es bastante más pequeño, fluctúa entre los 0,039 y los 0,078 joules por metro cuadrado por segundo¹⁵ (Valero, Ranz y Subiela, 1996: 3).

De los datos anteriores se induce cómo, prácticamente, el único flujo de energía (y el más útil) que entra al sistema cerrado en que habitan la especie humana y todas las demás formas de vida conocidas es la energía solar. Ésta es asimilada por las plantas, que la transforman en alimento y combustible, sustento para la vida.

En 1986, un grupo de científicos norteamericanos intentó cuantificar el impacto humano sobre la biosfera. Para ello definieron una variable, la producción primaria neta de la que se apropia el ser humano (PPN). Ésta representa la cantidad de energía que queda después de restar la respiración de los productores primarios (las plantas) del total de energía (solar) que se fija biológicamente en la Tierra (Vitousek, et al., 1986: 386-373). Los resultados de este estudio fueron reveladores: en 1986 la humanidad se apropió de alrededor de un 40% del potencial de productividad de la PPN terrestre. Esta cifra se reduce a un 25% si se contempla el potencial de productividad de la PPN terrestre y acuática.

La información presentada exige revisar las pautas del modo de vida de la humanidad en la actualidad. La capacidad de sustentación de la Tierra, en el largo plazo, estará dada no solamente por el tamaño de la población que ésta soporta, sino también por la tecnología que sustenta la vida humana. Por esta razón, es fundamental incorporar el análisis de la eficiencia en el uso de la energía y los procesos productivos al debate sobre sustentabilidad.

En la investigación sobre la capacidad sustentadora de la Tierra se incorporan al análisis algunas definiciones de la Biología, como la capacidad de carga. Esta es la aptitud de un ecosistema de mantener un número determinado de individuos de una misma especie. La anterior definición implica un límite máximo dentro del cual se puede reproducir la especie en un ecosistema dado, asegurando su permanencia en un horizonte temporal amplio; supone la capacidad del ecosistema de abastecer con el insumo necesario para la supervivencia y reproducción de la especie y su habilidad de asimilar los desechos producidos por los individuos, sin deteriorar la calidad de los recursos naturales (Deshmunkh, 1986: 300-304). El indicador económico que reúne algunos aspectos del concepto de capacidad de carga es la escala del sistema económico humano, que mide el consumo de recursos per cápita o “el flujo total - consumo de recursos - que va del ecosistema al subsistema económico y que luego retorna al ecosistema en forma de desechos” (Goodland, 1994: 24-25).

Desde múltiples enfoques, la Economía Ecológica enfrenta el tema de la sustentabilidad; por esta razón, profundiza su análisis en aspectos fundamentales relacionados con el desarrollo sostenible; muchas veces, incluso, llega a cuestionar otras interpretaciones.

Este es el caso de una de las principales recomendaciones formuladas por la Comisión Brundtland, en el informe que lle-

va su nombre. En 1987, la Comisión presentó un informe que analiza diferentes aspectos sociales, económicos y ambientales, claves para el desarrollo de la humanidad. Es en este informe donde se acuña el término “desarrollo sostenible”, definido como aquel desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.

El Informe Brundtland recomienda que, para alcanzar un desarrollo sostenible, todos los países deberían crecer a un 3% anual en los próximos 50 años. Aquello sería equivalente a un aumento de cinco a diez veces del producto industrial mundial en el mismo período. De esta manera, los países del Sur asegurarían la expansión de su sector exportador gracias al crecimiento de las economías del Norte. Sin embargo, si se toma en cuenta el nivel de presión sobre el entorno que es fruto de la escala actual de la economía mundial, parece difícil pensar en la factibilidad de seguir creciendo sin sacrificar aún más la calidad de vida sobre el planeta y agudizar los problemas ecológicos globales. Plan-tear el crecimiento económico como remedio exclusivo a la pobreza y al deterioro ambiental significa ignorar cuestiones fundamentales en el tema de la sustentabilidad, como la redistribución del uso de espacio ambiental global o el cambio en los patrones de consumo de las sociedades industrializadas.

Una vez más, enfrentar el tema de la producción desde un punto de vista multidisciplinario permite ampliar la óptica del análisis económico tradicional e incorporar nuevos elementos que aportan al tema de la sustentabilidad. Algunos autores han profundizado en la reflexión acerca de la equidad y los patrones de consumo en el estudio de los flujos comerciales entre países.

Uno de los temas que ha cobrado más importancia entre los economistas es la estructura del intercambio comercial de los países. La Economía Ecológica contribuye, desde su propio enfo-

que, a la comprensión de este tema. Para el caso de América Latina, se plantea la posibilidad de escribir una historia ecológica “como una historia de degradación causada por... exportaciones a expensas del capital natural.” Dado que “la capacidad de sustentación mundial es mayor que la suma de las capacidades de sustentación nacionales”, los países pueden hacer “uso selectivo de algunos productos de ecosistemas de otros países”, y crear una dependencia ecológica entre países. Muchas veces, la presión de las exportaciones incluso puede resultar en catástrofes ambientales a costa del bienestar de la población y de su seguridad alimentaria (Martínez Alier, 1995: 72, 77).

Desde la perspectiva de la Economía Ecológica, se sugiere la existencia de un intercambio ecológicamente desigual entre países; esta desigualdad es consecuencia del intercambio de tiempos de producción diferentes, cuando un país vende productos con un tiempo de reposición largo o infinito (como los recursos minerales o la fertilidad del suelo) para comprar bienes manufacturados rápidamente (Van Hauwermeiren, 1995: 1).

En este mismo orden de ideas, el subdesarrollo se caracteriza como la pérdida del potencial productivo de un país, debido a un proceso de explotación que altera los mecanismos ecológicos esenciales para la sustentabilidad de los factores de producción y la regeneración de los recursos naturales. Este tipo de proceso de explotación, que rebasa la capacidad sustentadora local, va dirigido a mercados externos de países con un fuerte aparato industrial, que dependen de la importación de capacidad productiva natural pues, en algunos casos, han devastado sus propios recursos naturales, y en otros, no son capaces de sostener los niveles de consumo de su población. Mientras los países en desarrollo actúen como la contraparte económica de la estructura comercial de los países industrializados, la integración global se traducirá en vulnerabilidad local e insostenibilidad (Van Hauwermeiren, 1995: 2, 10).

D. Instrumentos económicos de análisis de los procesos productivos

La reflexión sobre las aplicaciones de las leyes de la Termodinámica en el análisis económico motivó a varios investigadores a desarrollar instrumentos empíricos para conocer la intensidad del uso de los recursos naturales y la eficiencia energética de diferentes actividades humanas. El propósito de estos instrumentos permite calificarlos como instrumentos económicos y, sin duda, constituyen elementos útiles para evaluar la sustentabilidad de distintas opciones productivas.

Dos propiedades interesantes que deberían tener los indicadores que se aproximan al tema de la sustentabilidad son: primero, poseer un significado más amplio que aquel que define su medición inmediata, es decir, representar un fenómeno complejo y relevante para el desarrollo sustentable; y segundo, proporcionar elementos de carácter normativo, que permitan evaluar el avance hacia una situación objetivo (Claude, 1996: 7).

En esta sección se presentan tres instrumentos que responden a la descripción anterior. En primer lugar, se expone la Teoría General del Ahorro de Exergía que aporta con elementos interesantes de conexión entre la degradación física y la generación de ganancias, ambas consecuencias de los procesos productivos. Luego se introduce la huella ecológica, un instrumento desarrollado para cuantificar el espacio ambiental necesario para sustentar una actividad productiva.

Estos dos instrumentos tienen algunas características en común que los hacen especialmente interesantes con respecto a otro tipo de indicadores ambientales. Tanto la Teoría General del Ahorro de Exergía como la huella ecológica estudian flujos de recursos materiales y energéticos. Por tanto, se preocupan por un elemento clave del análisis ecológico, los flujos, tradicionalmen-

te ignorados en los indicadores ambientales, que centran su interés en los stocks sobrantes de recursos. Además, estos indicadores proponen interrelaciones sociales, económicas y ecológicas y fortalecen un análisis multidisciplinario, indispensable al pensar en la sustentabilidad (Spangenberg, 1996: 1-2).

Un tercer apartado de esta sección introduce algunos conceptos básicos sobre la Matriz Insumo-Producto. Esta herramienta, de fundamental importancia en el análisis y programación macroeconómicos, será utilizada en este trabajo para proponer una interpretación termodinámica de los coeficientes que se emplean para medir la productividad de los diferentes sectores productivos de una economía.

i. La Teoría General del Ahorro de Exergía

La Teoría General del Ahorro de Exergía (TGAE) fue presentada en 1986 por Antonio Valero, Miguel Ángel Lozano y Mariano Muñoz, investigadores de la Universidad de Zaragoza, España. La TGAE intenta no solo aportar con instrumentos cuantificables para el estudio de la eficiencia energética sino que propone conexiones sólidas entre Termodinámica y Economía (Naredo y Valero, 1989: 7-16).

La TGAE parte de dos principios: en primer lugar, que el ahorro de recursos debe basarse en la segunda ley de la Termodinámica, a través de la cuantificación de la energía utilizable o exergía; y en segundo lugar, que para calcular los costos de un sistema diseñado por el ser humano, es necesario conocer, además de las leyes de la Física, el propósito del sistema, el mismo que se evalúa en términos de eficiencia a través de la segunda ley de la Termodinámica.

A partir de los postulados de esta teoría, fue posible determinar una función de costo exergético para sistemas térmicos, la

misma que permitió dar una base objetiva al proceso de formación de los costos monetarios. Para ello, se requiere conocer los precios de la materia prima, de los recursos energéticos y del capital utilizado. Con un razonamiento similar, los autores han sugerido emplear funciones parecidas con aplicaciones en otros ámbitos de la producción. Es importante destacar que la TGAE intenta determinar los costos de un producto, medidos en unidades de recursos empleados, y no calcular su precio o valor.

La TGAE compara el enfoque tradicional del proceso productivo con un enfoque termodinámico. Parte de la conocida identidad de la Economía:

$$VA = PR - CI \quad (1)$$

donde VA = valor agregado, medido en unidades monetarias

PR = producción, medida en unidades monetarias

CI = consumo intermedio, medido en unidades monetarias

$PR > CI$

$VA > 0$.

La rentabilidad monetaria (ε) se definiría como:

$$\varepsilon = PR / CI \quad (2)$$

donde $\varepsilon > 1$.

De la misma manera, es posible establecer una identidad termodinámica como la siguiente:

$$F - P = L + R = I \quad (3)$$

donde F = recursos utilizados en el proceso, medidos en unidades energéticas

P = producto obtenido del proceso, medido en unidades energéticas

L = pérdida de calidad interna de la materia, medida en unidades energéticas

R = residuos generados por el proceso, medidos en unidades energéticas

I = irreversibilidad producto del proceso, medida en unidades energéticas

$$F > P$$

$$I > 0.$$

El rendimiento o eficiencia termodinámica¹⁶ (η) se define como:

$$\eta = P / F \tag{4}$$

donde $0 < \eta < 1$, por la ley de la entropía.

Si uno y otro análisis se refieren a los aspectos físicos y monetarios de un mismo proceso, si se conoce el precio de las unidades físicas introducidas en el proceso y de la producción obtenida y si no existen más costos monetarios que aquellos derivados de estas unidades físicas, se puede expresar la ecuación (3) de la siguiente manera:

$$PR = P_p * P$$

$$CI = P_f * F$$

donde P_p = precio del producto P , en unidades monetarias por unidad energética.

P_f = precio del factor F , en unidades monetarias por unidad energética.

Como se deriva de la ecuación (1), $PR > CI$. Por tanto, es posible conectar las ecuaciones (1) y (3) a partir de los precios:

$$(P_p * P) > (P_f * F)$$

$$\frac{P_p}{P} > \frac{P_f}{F} \tag{5}$$

Esta expresión muestra que, en el enfoque tradicional de la Economía, se exige que la relación entre el precio del producto y el precio del factor debe ser mayor que el número de unidades físicas requeridas para fabricar el producto. Esto equivale a decir que la ganancia de calidad, medida en términos monetarios, debe superar la pérdida física por unidad de producto. Se observa que el objetivo de incrementar la eficiencia termodinámica ($\eta = P / F$) coincide con el de aumentar la rentabilidad monetaria ($\varepsilon = PR / CI$) dado que:

$$\frac{PR}{CI} = \frac{P_p * P}{P_f * F}$$

En este sentido, toda innovación tecnológica que mejore la eficiencia termodinámica de un proceso, mejorará también su rentabilidad económica.

El análisis propuesto por los autores de la Universidad de Zaragoza es importante en la medida en que hace explícitas muchas de las contradicciones entre la Economía convencional y el análisis termodinámico, al mismo tiempo que busca establecer puentes de unión entre uno y otro enfoque. La principal paradoja que se ilustra en este análisis tiene que ver con las diferentes formas de entender el saldo de un proceso productivo. El enfoque termodinámico lo considera siempre como una pérdida de calidad interna. Esto se ilustra con eficiencias menores a la unidad ($\eta < 1$). Para el enfoque económico tradicional, este saldo es la propia producción, la misma que supone una ganancia que se expresa en una rentabilidad positiva ($\varepsilon > 1$).

Aquí se ilustra cómo la única conexión entre las unidades de factor y de producto, coherente con ambos enfoques, es la de los precios. Sin embargo, en términos de pérdida y ganancia, cada enfoque tiene una lógica distinta. La energía dispersada en un

proceso (la pérdida de calidad exergética) carece de valor de uso y también de precio porque el ambiente ha actuado, tradicionalmente, como un sumidero gratuito de este y otro tipo de residuos de los procesos productivos. De igual manera, el valor que se agrega a un producto en un proceso productivo y que se refleja en la ganancia monetaria de ese proceso no tiene ninguna correspondencia en unidades físicas.

Los mismos autores que desarrollaron la teoría sugieren que este tipo de contradicciones entre los distintos enfoques debería servir para ilustrar las ventajas de introducir múltiples dimensiones en un análisis teórico, sin que ninguna de ellas pretenda tener validez universal.

ii. La Huella Ecológica

La huella ecológica es un instrumento desarrollado por dos profesores canadienses, William Rees y Mathis Wackernagel, expuesto a profundidad en su libro “The Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth” (1996). Este instrumento busca crear conciencia y desarrollar una comprensión generalizada sobre los límites de la capacidad sustentadora del planeta, así como evaluar los efectos de medidas y soluciones alternativas. La huella ecológica parte de uno de los principios fundamentales de la sustentabilidad, derivado de la incorporación de las leyes de la Termodinámica al análisis económico: la noción de que no es posible utilizar los productos y procesos esenciales de la naturaleza a una velocidad superior a la que ellos se renuevan, ni verter desechos en el entorno a una velocidad superior a la que ellos se asimilan.

Los autores sugieren la existencia de un derecho fundamental de cada ser humano a utilizar una superficie del planeta para desarrollar sus funciones vitales. Dada la población actual del mundo, esta superficie es limitada, de 1,5 hectáreas per cápita.

ta. Sin embargo, en la práctica, por ejemplo, un norteamericano promedio emplea entre 4 y 5 hectáreas de tierra para sostener su nivel de consumo y su generación de desechos (lo que equivale a decir que su huella ecológica es de entre 4 y 5 hectáreas). Por tanto, si todos los habitantes del planeta aspirasen a vivir como un estadounidense, sería necesario tener tres planetas como la Tierra para sostener la vida.

La huella ecológica identifica todos los flujos de materia y energía desde y hacia una economía y los expresa en términos de los requerimientos de tierra y agua necesarios para sostenerlos, independientemente de la región del planeta de donde provengan esos flujos. El análisis que la huella ecológica permite realizar sirve para contabilizar los requerimientos de consumo de recursos y asimilación de desechos de una población humana en términos del área productiva correspondiente a ese nivel de producción y contaminación. El concepto de huella ecológica se refiere al total de capacidad de carga de la que se apropia una región determinada para su subsistencia.

El modelo desarrollado por Rees y Wackernagel es una primera aproximación al cálculo de la huella ecológica y, por tanto, incurre en algunas simplificaciones y supuestos generalizadores que le restan precisión. Sin embargo, los resultados obtenidos plantean importantes elementos de análisis, los mismos que vale la pena rescatar y describir.

Para determinar la huella ecológica de una región, los autores parten estimando el consumo per cápita anual de productos específicos, a partir de datos estadísticos regionales. En estos cálculos, se emplea la noción de consumo aparente. Por esta razón, los datos se corrigen por un factor comercial. Al total de producción de una región, se suman las importaciones y se restan las exportaciones, antes de dividirlo para el total de población de la zona.

El siguiente paso consiste en calcular el área productiva apropiada per cápita en la región. Para ello, se divide el consumo per cápita promedio antes hallado (medido en kilogramos per cápita, por ejemplo), para la productividad anual media de cada producto (medida en kilogramos por hectárea, por ejemplo). Se obtiene, entonces, el número de hectáreas de las que cada persona se apropia para satisfacer sus necesidades de consumo.

Después se calcula la huella ecológica per cápita de la región sumando las apropiaciones de tierra productiva de los diferentes bienes definidos. Con ese valor, es posible calcular la huella ecológica de la población en cuestión, al multiplicar la huella ecológica per cápita por el total de población.

Este cálculo, que parecería bastante simple, supone varias complicaciones. Por ejemplo, el consumo de una región determinada está compuesto por una variedad de bienes que obedecen a procesos productivos diferentes. De igual manera, la complejidad de los procesos obliga a retroceder en el ciclo productivo y esto aumenta la dificultad en la recolección de información. Poco a poco, es necesario incluir los diferentes servicios que presta la naturaleza y ello complica el análisis.

Para simplificar las tareas de recolección de información, Rees y Wackernagel proponen la adopción de algunos criterios de análisis. Por ejemplo, sugieren clasificar el consumo en categorías similares a las que éste se clasifica en las estadísticas oficiales (alimentación, vivienda, transporte, bienes de consumo y servicios). De igual manera, recomiendan mantener la clasificación de usos de tierra de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), en la cual distinguen los siguientes tipos de suelo: tierra apropiada por el uso de energías fósiles, construcciones, jardines, cultivos, pastos, bosques manejados, bosques vírgenes y áreas improductivas.

Los autores desarrollan en su libro algunos ejemplos de aplicaciones de la huella ecológica. En todos ellos se descubre cómo la distribución del consumo del espacio ambiental mundial, medida a través de la huella ecológica, resulta de una aplicación económica de las leyes de la Termodinámica. La primera ley induce a comprender que todos los flujos que entran y salen de los procesos productivos – sean o no útiles para la humanidad - representan una carga para el ambiente y se contabilizan en su consumo de espacio ambiental. Por su parte, la segunda ley introduce la noción del aceleramiento del deterioro entrópico del planeta por causa de la acción humana, pero también presenta la opción de incrementar la eficiencia termodinámica de los procesos productivos.

A partir de los ejercicios empíricos propuestos en el trabajo de Rees y Wackernagel, los autores presentan una reflexión sobre estrategias que conducen a la sustentabilidad. Cuestionan el enfoque convencional que promueve la búsqueda de tecnología más eficiente en el uso de energía, pues prevén que los ahorros generados por esta tecnología se traducirían en incrementos salariales, mayores dividendos o precios más bajos, los mismos que finalmente favorecerían la mayor intensidad en el consumo de la sociedad. Los autores son muy críticos con respecto a los niveles de consumo de las sociedades industrializadas. Desde su óptica, la solución no está exclusivamente en ampliar artificialmente la capacidad de carga del planeta a través de mejoras tecnológicas. Por el contrario, ellos proponen una revisión de las condiciones actuales de equidad en el uso de los bienes y servicios ambientales.

Rees y Wackernagel son escépticos de los efectos que el libre comercio tiene sobre la sustentabilidad. Los autores siguen la línea expuesta en este trabajo, según la cual el comercio libre desplaza la carga ambiental de un territorio hacia otro, muchas veces a costa de la sustentabilidad y el bienestar de la población lo-

cal. Van aún más lejos, al sugerir que la urbanización y la globalización del comercio inmunizan a ciertas poblaciones de las consecuencias de inadecuadas prácticas locales de manejo de recursos y favorecen una “ceguera ecológica colectiva”, que dificulta la adopción de políticas en favor de la sustentabilidad.

iii. La Matriz Insumo-Producto

La Matriz Insumo-Producto (en adelante, MIP) es un instrumento de análisis y programación macroeconómica. Es parte de un modelo teórico que busca “explicar la interdependencia estructural que existe entre los diversos sectores productivos y entre éstos y los usuarios de los productos finales” (León y Marconi, 1991: 46).

El principal elemento para la elaboración de la MIP son los flujos de bienes que circulan en los mercados y se intercambian entre los sectores productivos. El objetivo de esta circulación es proveer de los recursos que necesitan los diferentes sectores para alimentar su propio proceso productivo. Las necesidades de insumos (consumo intermedio) de los sectores de la producción están dadas por su estructura tecnológica.

Con el objeto de abordar el tema de la tecnología, en la elaboración de la MIP se realiza un supuesto metodológico importante. Para determinar la razón tecnológica que regula los flujos de productos, se parte de la hipótesis de que la cantidad que cada sector compra de un producto es directamente proporcional a la producción total que este sector genera. Es decir, se asume que las funciones de producción son lineales.

Puesto que la MIP es empleada en la agregación de flujos de productos entre los distintos sectores productivos, en su elaboración se asume que todas las actividades productivas que se agregan en un sector poseen una misma función de producción.

Como se describió en el párrafo anterior, esta función trae implícita la idea de que cada rama productiva elabora un grupo de productos homogéneos y posee una misma estructura de insumos.

En la estructura de la MIP, no se incluyen todos aquellos bienes y servicios que, sin ser el objetivo de un proceso productivo, también se generan a partir de él, como por ejemplo las emisiones de gases o aguas contaminadas que resultan de diferentes actividades industriales. Tampoco se toma en cuenta a otros bienes y servicios que, involuntariamente, son generados a partir de una actividad productiva y sirven de insumo a otras. Este es el caso de la estabilidad climática y de la calidad del suelo, servicios ambientales producidos por un manejo adecuado de varias actividades productivas e importantes insumos para el sector agrícola. En efecto, no se incluyen los bienes y servicios ambientales antes descritos, lo cual determina que éstos permanezcan fuera de este importante instrumento de programación económica.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, la MIP proporciona información valiosa pues permite descubrir las interrelaciones que existen entre los distintos sectores de la economía. Es decir, ilustra los encadenamientos productivos – o los flujos de entrada y salida- que dan forma a los bienes finales. Implícitamente, esta función de la MIP abre la posibilidad de evaluar la eficiencia con la que cada sector aprovecha los insumos que utiliza.

Como se analizará a profundidad en el capítulo 4, la MIP no satisface los supuestos teóricos planteados por las aplicaciones de la Termodinámica en el análisis económico. Varias han sido las críticas formuladas no sólo a este instrumento, sino al propio Sistema de Cuentas Nacionales, del cual forma parte.

Básicamente, la Economía Ambiental ha identificado que existen tres limitaciones del Sistema de Cuentas Nacionales. Primero, el agotamiento de los recursos naturales se considera como parte de la producción y no de la depreciación. Siguiendo esta lógica, si los recursos se explotan a un ritmo más intenso, mayor será el crecimiento del producto. Segundo, los gastos de protección y reparación del ambiente se registran como aportes al ingreso nacional. Para corregir esta limitación se han propuesto dos alternativas: o registrar estos gastos como consumo intermedio, de manera que ajusten el producto hacia abajo; o considerar al medio ambiente como un stock de capital fijo y convertir a estos gastos en gastos defensivos, que compensan el agotamiento del capital y que incrementan el PIB. Tercero, no se toma en cuenta la degradación de los activos naturales ni se considera la disminución de la capacidad de la economía de asegurar un ingreso equivalente o superior en el futuro (Claude y Pizarro, 1995: 9-13).

Los ejercicios que se desarrollarán más adelante permiten verificar las limitaciones que presenta la MIP desde la óptica de la teoría aquí propuesta. A pesar de esta restricción, también ilustran elementos interesantes sobre la estructura productiva ecuatoriana, especialmente en lo relacionado al consumo de energía.

E. Presentación del análisis empírico

En las siguientes secciones de la investigación se presentarán dos aplicaciones de la teoría antes expuesta. El objetivo de estas aplicaciones es abordar temas económicos desde una óptica que acoge elementos no convencionales en el análisis económico. Se busca con ello ilustrar en dos casos prácticos las ventajas que ofrece la incorporación de las leyes de la Termodinámica en la comprensión de los procesos productivos.

Los indicadores económicos que se elaborarán buscan ilustrar aspectos cualitativos con respecto a la sostenibilidad de las actividades económicas escogidas para el estudio. Autores como Claude (1996:7) proponen que este tipo de instrumentos debe cumplir dos condiciones. Primero, han de poseer un significado más amplio que la medición inmediata de una variable, que permita entender un fenómeno complejo y relevante para el desarrollo sustentable. Y segundo, han de proporcionar criterios de tipo normativo para identificar una senda de desarrollo deseable en el mediano y largo plazo.

Los instrumentos que se aplicarán en los capítulos 3 y 4 buscan incorporar elementos de análisis entrópico en la comprensión de los procesos productivos. Las próximas secciones ilustrarán la utilidad de este tipo de indicadores para abordar problemas económicos desde la óptica de la sustentabilidad. La ventaja que tiene el análisis termodinámico es que presenta diferentes usos del ambiente en unidades homogéneas, lo cual permite comparar y conocer los cambios en la concentración material que producen los procesos productivos e investigar las interdependencias que de ellos surgen (Faber, *et.al.*, 1987: 123).

Para los ejercicios que se desarrollan en los apartados siguientes, es importante destacar que se mantendrá una línea similar de análisis, tanto en las aplicaciones microeconómicas (de productos específicos) como en el caso macroeconómico (de escala de la economía). Aplicar en los dos tipos de ejercicios un solo enfoque teórico permite integrar las conclusiones y proporciona guías útiles para la política ambiental.

Siguiendo esta línea de trabajo, el primer caso que se presenta en los apartados siguientes plantea un estudio microeconómico comparativo entre los autobuses que funcionan con electricidad y aquellos que utilizan combustibles fósiles. Con ello se busca evaluar el cambio que supuso para la ciudad de Quito

la instalación del Sistema Trolebús, en términos de eficiencia energética, rentabilidad económica y apropiación de espacio ambiental.

En este análisis se utilizarán los instrumentos económicos antes propuestos: la Teoría General del Ahorro de Exergía y la Huella Ecológica. Se emplearán los mismos conceptos teóricos expuestos en este capítulo.

La segunda aplicación de la teoría se dirigirá a un análisis de la Matriz Insumo-Producto. Este instrumento, parte fundamental de las Cuentas Nacionales, se construye para “examinar la interdependencia entre las ramas de actividad económica que conforman un aparato productivo” (León y Marconi, 1991: 126).

La matriz cuantifica las relaciones que existen entre las diferentes ramas productivas y entre ellas y los usuarios finales de la producción. Para representar las transformaciones que ocurren en el aparato productivo, la matriz emplea coeficientes técnicos que ilustran la eficiencia de los procesos de producción.

La aplicación macroeconómica propuesta para este trabajo se relaciona con una interpretación de la Matriz Insumo-Producto en dos direcciones. Por un lado, se identificará la información de la matriz del Ecuador relacionada con el uso de productos energéticos. Esta información permitirá explorar el comportamiento de los coeficientes técnicos en los últimos cuatro años e identificar algunos encadenamientos productivos vinculados a los insumos energéticos. Por otro lado, se plantearán algunos problemas teóricos que podrían surgir al interpretar la Matriz Insumo-Producto desde la propuesta aquí desarrollada.

NOTAS

- 1 Autores como Robert Constanza definen a la Economía Ecológica como *“una transdisciplina científica emergente que reconoce límites ecológicos al crecimiento económico y que se ocupa de estudiar y manejar el problema de la sustentabilidad. La Economía Ecológica no es una rama o especialización de la Economía, pues como avance hacia la transdisciplina, promueve un diálogo constructivo... estimulando la proposición de un sistema conceptual e instrumental propio”* (Daly, 1991, en Quiroga, R. y Van Hauwermeiren, S., 1996: 9).
- 2 El científico francés Sadi Carnot (1769-1832) se dedicó al estudio de las máquinas de vapor. Su trabajo culminó con la formulación de la segunda ley de la Termodinámica en 1850 y 1851 (Martínez Alier, 1991: 103).
- 3 Tal como se la ha desarrollado en el mundo occidental, la ciencia es una “economía” del proceso de almacenamiento de conocimiento común, movida por la “curiosidad ociosa” del ser humano, por su encanto por el conocimiento en sí. El pensamiento racional ha desarrollado hábitos lógicos y analíticos para construir herramientas que faciliten el proceso de razonamiento. Sin embargo, el intento humano permanente de racionalizar la realidad, se ha topado con serias limitaciones al tener que aceptar, como en el caso de la Mecánica y la Termodinámica, que en la realidad muchas leyes de la naturaleza se oponen y aún así, siguen siendo válidas (Georgescu-Roegen, 1996: 69-84).
- 4 En 1885, el alemán Rudolf Clausius (1822-1888) publicó un folleto titulado “Sobre las reservas energéticas en la naturaleza y su aprovechamiento en beneficio de la humanidad”; en él hizo un análisis de la eficiencia de la máquina de vapor en términos de la energía que ésta utiliza (Martínez Alier, 1991: 96-113).
- 5 Por sistema aislado, se entiende a aquel que no está sujeto a ningún tipo de intercambio material con el entorno. La tierra es un sistema aislado en la medida en que la única fuente de la cual importa energía es el Sol.
- 6 La mecánica clásica describe sistemas que contienen pocas partículas (en sistemas complejos como el planetario, considera a grandes cuerpos – los planetas- unidades individuales) a través de variables como la masa, la velocidad y la posición. Para representar sistemas que contienen un gran número de partículas (sistemas termodinámicos), es necesario emplear nuevas magnitudes físicas – la temperatura o la presión- y nuevas leyes que determinen el comportamiento de estas magnitudes. De igual manera, mientras que la mecánica clásica describe fenómenos

- que son temporalmente reversibles, los sistemas termodinámicos no permiten la irreversibilidad de los procesos (Faber, *et.al.*, 1987: 77-79).
- 7 La microeconomía neoclásica corrige esta limitación cuantificando el valor de la eliminación de los subproductos de un proceso productivo e internalizando ese valor a la función de costos de la empresa. El enfoque termodinámico de la Economía Ecológica sugiere considerar a todos los flujos materiales como parte del producto del proceso productivo, sin importar si se clasifican como funcionales o innecesarios para los seres humanos (Vogel, 1989: 195).
- 8 “For Marshall, capital is all things other than land, which yield income... (T)he term land being taken to include all free gifts of nature, such as mines, fisheries, etc., which yield income.”
- 9 Otros autores van aún más allá y proponen incluso la necesidad de cuantificar la degradación natural provocada por el ser humano para “colocar a la humanidad en un punto definido de su evolución hacia la absoluta degradación entrópica” (Valero, Ranz y Subiela, 1996: 1).
- 10 El término proceso lleva implícita la noción de cambio. Todo aquello que rodea a un proceso y no forma parte de él es su entorno. Entrada o input es todo elemento que pasa del entorno al proceso y salida o output es todo elemento que pasa del proceso al entorno.
- 11 Con estas reflexiones no se pretende proponer una teoría del valor diferente, basada en el contenido energético de los bienes. Lo que sí se busca es aportar con nuevos elementos al análisis de las cualidades que otorgan valor a los bienes.
- 12 Esto se puede explicar por las abismales diferencias en el consumo energético de ricos y pobres. El consumo de energía primaria per cápita en países ricos fluctúa entre los 25 y los 100 millones de kilocalorías anuales (frente a un consumo de 300 mil kilocalorías anuales en los países pobres). Esta cifra excluye la energía alimentaria pues en los países ricos proviene principalmente de procesos industriales movidos por petróleo que ya se están contabilizando en la primera cifra. El aporte del consumo energético directo en alimentación es insignificante frente a este número: apenas un millón de kilocalorías anuales (Martínez Alier, 1991: 45-46).
- 13 Otros autores que se han preocupado por temas relacionados con la capacidad de carga del planeta son los norteamericanos William Vogt (1948) y Fairfield Osborn (1953), así como Georg Borgstrom en las décadas de los 60 y 70. Desde los años 70, William Rees ha trabajado en los fundamentos de la huella ecológica. En los años 80, William Catton analizó los efectos de exceder temporalmente la capacidad de carga mundial, Higgins produjo un informe sobre la capacidad sustentadora

de población en los países en desarrollo, Ragnar Overby propuso la comparación de las economías a partir de sus demandas de capacidad de carga, y Harwell y Hutchinson analizaron la pérdida de capacidad de carga que seguiría a la guerra nuclear. En la década de los 90, Amigos de la Tierra propuso el concepto de “espacio ambiental” para determinar la participación justa de los países en la capacidad productiva y asimilativa global. El espacio ambiental es la cantidad de recursos naturales que se utiliza para la satisfacción de las necesidades materiales.

- 14 Se ha calculado que de esta energía, la Tierra emplea un 42% en calentarse, refleja un 34%, con un 23% evapora el agua y apenas el 1% restante utiliza para mover el aire y el agua.
- 15 Esta energía se emplea en mantener constante la temperatura de la tierra, proporcionar energía potencial al agua, provocar la fotosíntesis y generar fenómenos que dispersan gran cantidad de material, como el viento y las aguas torrenciales.
- 16 Puesto que de acuerdo a la primera ley de la Termodinámica, la energía se conserva, la máxima cantidad de trabajo que se puede extraer de una máquina es la diferencia entre el importe de calor recibido y el importe de calor emitido por la máquina. La relación entre estas dos cantidades es la eficiencia termodinámica, que adquiere siempre valores menores a uno (Faber, *et.al.*, 1987: 89-90).

3. ANÁLISIS ECONÓMICO Y TERMODINÁMICOS DE DOS ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL DISTRITO METROPOLITANO

A. Aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía

i. Supuestos y metodología

En esta sección de la investigación, se desarrollará una aplicación del análisis teórico antes expuesto. En particular, se empleará el modelo propuesto por la Teoría General del Ahorro de Exergía (TGAE) para comparar la eficiencia energética y la rentabilidad económica de dos alternativas de transporte para la ciudad de Quito. El objetivo de esta aplicación es abordar un tema económico desde una óptica que incorpora elementos no convencionales en el análisis económico. Se busca ilustrar, en este caso práctico, una aplicación de las leyes de la Termodinámica en el análisis de los procesos productivos.

El caso que se presenta plantea un análisis microeconómico que compara los autobuses que tienen un motor que funciona con electricidad con aquellos cuyo motor utiliza diesel. A partir de los resultados se interpretarán algunos de los cambios que la instalación del Sistema Trolebús supuso para la ciudad de Quito. Como se expuso en la presentación de la TGAE, esta teoría fue diseñada para evaluar la eficiencia de sistemas térmicos. Por lo tanto, para aplicarla a un sistema de transporte, es necesario

hacer algunas adaptaciones en las variables empleadas. Básicamente, se debe destacar la diferencia que existe entre cuantificar en unidades energéticas el producto de un proceso térmico (calor) y el de un sistema de transporte (el servicio de transporte propiamente dicho). En el primer caso, es evidente que el producto de un sistema térmico se mide en unidades energéticas. Sin embargo, cuantificar el servicio de transporte en kilocalorías presenta complicaciones adicionales.

Para los fines de este ejercicio, se ha considerado que el servicio que presta el sistema de transporte (o su producción P) es el ahorro de energía que representa para los pasajeros, quienes no necesitan caminar para movilizarse. Es decir, por cada hora “no caminada”, los usuarios del sistema de transporte ahorran el consumo de alrededor de 0,3 kilocalorías de alimentos, las mismas que deberían ingerir si deciden caminar durante ese período de tiempo.

Como se observará, trabajar con un sistema de transporte exige plantear algunos supuestos diferentes a aquellos originalmente empleados en la TGAE. Esto se explica porque, mientras en el caso de un sistema térmico es posible aislar al sistema como un solo flujo al cual entran insumos y del cual se obtiene cierta producción, en el caso aquí propuesto no se logra aislar un solo proceso sino que se interrelaciona el funcionamiento de dos sistemas diferentes: la energía que alimenta los motores de los autobuses y aquella que ahorran los cuerpos de los usuarios de los autobuses.

Por su parte, la generación de residuos (R) se determinará a partir de la eficiencia de los motores de los autobuses. Se calculará la cantidad de energía de residuo mediante de un coeficiente que exprese la proporción de la energía que el motor no transforma en energía cinética (de movimiento) y que se disipa en forma de calor o ruido.

Por la disponibilidad de información y la complejidad de la actividad, el análisis se centrará en la operación¹ de dos *tipos de autobuses*: uno con una flota de motor eléctrico y otro con motores a diesel en la *ruta del Trolebús*, desde la Estación Sur hasta la Estación Norte, en un espacio temporal de *un mes*. Se trabajará con información de tarifas eléctricas, precios de los pasajes, volumen de usuarios y otros datos, obtenida durante el período julio-diciembre de 1996. Es necesario subrayar que el análisis no incluirá las rutas que alimentan el sistema integrado de transporte en las Estaciones Sur y Norte.

El ejercicio que se realizará busca comparar el consumo energético de dos clases de motores que difieren en el tipo de energía que los alimenta. Para centrar la atención del análisis en los aspectos energéticos de las dos alternativas de transporte, se ha formulado un supuesto fundamental, según el cual se asume que - con excepción del motor - las demás características de las dos clases de autobuses son similares. Este supuesto no se aleja de la realidad pues, como se explicará más adelante, en el mercado se ofrecen autobuses con motor a diesel, de igual capacidad y comodidades que los trolebuses que, actualmente, circulan por la ciudad de Quito.

De la explicación anterior, se derivan los siguientes elementos que complementan el supuesto fundamental descrito:

1. Existe un carril exclusivo por el cual circulan los autobuses de motor eléctrico y a diesel.
2. El chasis y la carrocería de los dos tipos de autobuses son iguales, por tanto su capacidad es la misma. Por la misma razón, tanto el Trolebús como el autobús de motor a diesel son igualmente cómodos y seguros.
3. El sistema de Trolebús es tan rápido como el de los autobuses de motor a diesel.

Cuadro 1: Variables de la Teoría General del Ahorro de Exergía

SIGNIFICADO		FORMA DE CÁLCULO	UNIDADES
Variables exógenas			
PR	Producción	Número de usuarios * Precio del pasaje	Monetarias
CI	Consumo Intermedio	Insumo energético * Precio del insumo	Monetarias
F	Insumos	Rendimiento insumo energético * Longitud recorrido	Energéticas
P	Producción	Calorías de caminata ahorradas	Energéticas
R	Residuos generados	(1-Rendimiento del sistema) * Insumo energético	Energéticas
P_f	Precio de F	Tarifa por unidad energética consumida	Monet./Ener.
Variables endógenas			
VA	Valor agregado	$VA = PR - CI$	Monetarias
L	Pérdida de calidad interna	$L = F - P - R$	Energéticas
I	Irreversibilidad	$I = L + R = F - P$	Energéticas
ε	Rentabilidad monetaria	$\varepsilon = PR / CI$	-
η	Eficiencia energética	$\eta = P / F$	-
P_p	Precio de P	$P_p = PR / P$	Monet./Ener.

Elaboración: La autora

4. El precio que paga el usuario por el recorrido es el mismo en cualquiera de los dos tipos de autobuses.
5. Los costos de mantenimiento son iguales para el Trolebús y los autobuses de motor a diesel.

Las variables que se emplearán en las identidades de la TGAE se describen en el Cuadro 1. En él se incluye también la forma en que estas variables serán calculadas y las unidades de medida.

ii. Desarrollo empírico

Para aplicar la TGAE al caso descrito se empleará la información que se recoge en el Cuadro 2. Los datos se refieren a un período temporal de un mes y se trabajará con el agregado para las 54 unidades que, en el período estudiado, operaron en el Sistema Trolebús. La información para los autobuses de motor a diesel se ha calculado también para una flota de 54 unidades.

Cuadro 2: Información sobre los Sistemas de Transporte

DATO (Unidades) / TIPO DE AUTOBÚS	MOTOR ELECTRICO	MOTOR A DIESEL
Precio del pasaje (sucres por recorrido)	616,9	616,9
Usuarios (número de personas)	4.415.918	4.415.918
Tamaño del recorrido (Km.)	350.870	350.870
Insumo energético consumido (Kcal)	718.483.448	4.140.922.118
Precio del insumo energético (sucres por Kcal)	0,267	0,08
Rendimiento del sistema (%)	75,22	37,5

Fuente: Unidad Operadora del Sistema Trolebús

Elaboración: La autora

Antes de sustituir los datos en las ecuaciones de la TGAE, es importante explicar el origen de la información que se recoge en el Cuadro 2. El precio del pasaje de 616,9 sucres es un valor ponderado de la tarifa normal (700 sucres) y la tarifa especial para niños y personas de la tercera edad (400 sucres), según el porcentaje de pasajeros de cada tipo en el mes de julio de 1996. El dato del número de usuarios también corresponde al mes de julio de 1996. El tamaño del recorrido es el total de kilómetros cubiertos por las 54 unidades de Trolebús en el período comprendido entre el 24 de julio y el 27 de agosto de 1996.

Para el Trolebús, el insumo energético consumido es el total de energía eléctrica que recibieron las 54 unidades entre el 24 de julio y el 27 de agosto de 1996. Para el autobús con motor a diesel, el insumo energético consumido se calculó multiplicando el rendimiento de un autobús Volvo B58 Articulado Intercooler 1997 (1,35 litros de diesel/Km.) por el tamaño del recorrido (350.870 Km.) y transformando ese valor a Kcal.

Para calcular el precio del insumo eléctrico, se tomó en cuenta que el Sistema Trolebús tiene una tarifa eléctrica especial de 230 sucres por kw/h, en la cual se incluyen todas las tasas e impuestos que, por ley, se pagan con la electricidad². Para los autobuses con motor a diesel se utilizó el precio de mercado del galón de diesel al 1º de enero de 1997: 3.155 sucres/galón. Las conversiones de kw/h y galones de diesel a Kcal se realizaron a través de los coeficientes de conversión propuestos por OLADE (1996: 2).

Las unidades del Sistema Trolebús tienen dos motores, uno eléctrico y otro a diesel, con el cual funcionan cuando están fuera del tendido eléctrico aéreo. Para este ejercicio se ha supuesto que los autobuses utilizaron, exclusivamente, el motor eléctrico. Este motor es de tipo asincrónico y, por esta razón, el 72% de la energía que consume es la que efectivamente recibe del tendi-

do eléctrico, y el 28% restante es energía que genera el propio motor al frenar o bajar. El motor del Trolebús tiene un rendimiento muy alto (97%). Sin embargo, a lo largo del sistema de abastecimiento de energía eléctrica existen pérdidas que es necesario cuantificar.

De cada 100 kw/h que el Sistema Trolebús absorbe de la Empresa Eléctrica Quito, 6,5 kw/h se pierden en el transformador y en el semiconductor de la subestación; 5 kw/h se pierden en la línea aérea, por la resistencia de la línea y la transmisión, y 6 kw/h se pierden al ingresar al Trolebús, por conmutación. Es decir, ingresan 82,5 kw/h al Trolebús. De esos 82,5 kw/h, el 94% entra al motor del autobús para impulsar su movimiento y el 6% restante alimenta los sistemas auxiliares (ventilación, micrófonos, luz y otros). De los 77,5 kw/h ($82,5 \text{ kw/h} * 0,94$) que ingresan al motor del autobús, éste emplea un 97% (es decir 75,22 kw/h) para movimiento. De ahí que el rendimiento del Sistema Trolebús sea de 75,22%. Para el caso del autobús a diesel, el rendimiento del sistema coincide con el rendimiento del motor del autobús, al cual se alimenta casi directamente con el combustible. El motor de un autobús a diesel nuevo tiene un rendimiento que fluctúa entre 35 y 40%. Para el ejercicio se tomó un valor intermedio de 37,5%.

Como se explicó anteriormente, para expresar la producción de los sistemas de transporte en unidades energéticas, se cuantificará el ahorro calórico que supuso a los usuarios no tener que caminar la trayectoria en la cual utilizaron el autobús. A pesar de que no todos los usuarios recorren en el autobús su trayecto completo y de que en un recorrido el autobús puede transportar un número total de pasajeros superior a su capacidad, se observa que en el período analizado, el sistema -que transportó a 4.415.918 personas- no superó su capacidad C , de 180 pasajeros por autobús, en 54 autobuses que realizan un promedio de

20 viajes al día en el trayecto de 11,5 Km. que existe entre la Estación Norte y la Estación Sur.

$$C = 180 \frac{\text{personas}}{\text{viaje} - \text{autobús}} * 54 \text{ autobuses} * 20 \frac{\text{viajes}}{\text{día}} * 30 \text{ días}$$

$$C = 5.832.000 \text{ personas} > 4.415.918 \text{ personas efectivamente transportadas}$$

Cada usuario del sistema, con el pago de un pasaje, adquiere el derecho a realizar un recorrido completo (de Norte a Sur o de Sur a Norte) en Trolebús. Para el análisis planteado se asumirá que el servicio permitió a cada una de estas 4.415.918 personas ahorrar una caminata de 11,5 Km. Esta distancia es la que existe entre las Estaciones Norte y Sur. A pesar de que el pasajero que no sale de las instalaciones de la Estación podría, con un mismo pasaje, circular cuantas veces quisiera entre las dos Estaciones, se asume que 11,5 Km. es el límite máximo de la trayectoria, lo cual reflejaría un comportamiento racional por parte de los usuarios.

Según los datos anteriores, el ahorro calórico que supuso a los usuarios no tener que caminar la trayectoria en la cual utilizaron el autobús se calculará a partir del número de usuarios y el total de kilómetros recorridos por los autobuses. Estos dos datos permiten obtener un total de kilómetros “producidos” por el sistema de transporte para satisfacer las necesidades del total de los usuarios. La producción del sistema de transporte, medida en unidades calóricas (P), se calculará multiplicando la cantidad de calorías que esas personas consumirían si tuviesen que caminar la trayectoria recorrida por el autobús. Para realizar ese cálculo, se tomará una velocidad media de caminata de 3 Km./hora para una persona adulta. A pesar de que la velocidad promedio de caminata es mayor (cerca a los 4 Km./hora), se decidió trabajar con un valor más bajo pues, en una caminata de 11,5 Km., el rendimiento de los caminantes es decreciente, lo cual reduce su velocidad media.

$$P = \frac{0,3 \frac{Kcal}{hora - persona}}{3 \frac{Km}{hora}} * 11,5Km * 4.415.918 personas$$

$$P = 5.078.306 Kcal$$

Con los datos antes presentados, es posible despejar el resto de variables endógenas de las identidades de la TGAE. Para el sistema de autobuses eléctricos (Trolebús), estas identidades serán:

$$VA = PR - CI$$

$$VA = 2.724.223.973suces - 19.212.247suces$$

$$VA = 2.705.011.726suces$$

$$\varepsilon = \frac{PR}{CI}$$

$$\varepsilon = \frac{2.724.23.973suces}{19.212.247suces}$$

$$\varepsilon = 141\text{,}8$$

$$L = F - P - R$$

$$L = 718.483.448Kcal - 5.078.306Kcal - (1 - 0.7522) * 718.483.448Kcal$$

$$L = 718.483.448Kcal - 5.078.306Kcal - 178.040.198Kcal$$

$$L = 535.364.944Kcal$$

$$I = L + R$$

$$I = 535.364.944Kcal + 178.040.198Kcal$$

$$I = 713.405.143Kcal$$

$$\eta = \frac{P}{F}$$

$$\eta = \frac{5.078.306 \text{ Kcal}}{718.483.448 \text{ Kcal}}$$

$$\eta = 0,0071$$

$$P_p = \frac{PR}{P}$$

$$P_p = \frac{2.724.223.973 \text{ sucres}}{5.078.306 \text{ Kcal}}$$

$$P_p = 536,4 \frac{\text{sucres}}{\text{Kcal}}$$

$$P_f = 0,267 \frac{\text{sucres}}{\text{Kcal}}$$

Las mismas identidades podrían plantearse para el sistema de autobuses con motor a diesel, como se describe a continuación.

$$VA = PR - CI$$

$$VA = (4.415.918 \text{ personas} * 616,9 \frac{\text{sucres}}{\text{persona}}) - (4.140.922.118 \text{ Kcal} * 0,08 \frac{\text{sucres}}{\text{Kcal}})$$

$$VA = 2.724.223.973 \text{ sucres} - 332.097.812 \text{ sucres}$$

$$VA = 2.392.126.161 \text{ sucres}$$

$$\varepsilon = \frac{PR}{CI}$$

$$\varepsilon = \frac{2.724.23.973 \text{ sucres}}{332.097.809 \text{ sucres}}$$

$$\varepsilon = 8,2$$

$$L = F - P - R$$

$$L = 4.140.922.118 \text{ Kcal} - 5.078.306 \text{ Kcal} - (1 - 0.375) * 4.140.922.118 \text{ Kcal}$$

$$L = 4.140.922.118 \text{ Kcal} - 5.078.306 \text{ Kcal} - 2.588.076.324 \text{ Kcal}$$

$$L = 1.547.767.489 \text{ Kcal}$$

$$I = L + R$$

$$I = 1.547.767.489 \text{ Kcal} + 2.588.076.324 \text{ Kcal}$$

$$I = 4.135.843.813 \text{ Kcal}$$

$$\eta = \frac{P}{F}$$

$$\eta = \frac{5.078.306 \text{ Kcal}}{4.140.922.118 \text{ Kcal}}$$

$$\eta = 0,0012$$

$$P_p = \frac{PR}{P}$$

$$P_p = \frac{2.724.223.973 \text{ sucres}}{5.078.306 \text{ Kcal}}$$

$$P_p = 536,4 \frac{\text{sucres}}{\text{Kcal}}$$

$$P_f = 0,08 \frac{\text{sucres}}{\text{Kcal}}$$

Cuadro 3: Resultados de la aplicación de la TGAE

RESULTADOS	MOTOR ELECTRICO (a)	MOTOR A DIESEL (b)	RELACIONES (b / a)
Producción PR, en sucres	2.724.223.973	2.724.223.973	1
Consumo Intermedio CI, en sucres	19.212.247	332.097.812	17,3
Valor Agregado VA, en sucres	2.705.011.726	2.392.126.161	0,884
Rentabilidad monetaria $\epsilon = PR / CI$	141,8	8,2	0,058
Producción P, en Kcal	5.078.306	5.078.306	1
Insumos empleados F, en Kcal	718.483.448	4.140.922.118	5,8
Eficiencia energética $\eta = P/F$	0,0071	0,0012	0,174
Pérdida de calidad interna L, en Kcal	535.364.944	1.547.767.489	2,9
Residuos R, en Kcal	178.040.198	2.588.076.324	14,5
Irreversibilidad I, en Kcal	713.405.143	4.135.843.813	5,8

Elaboración: La autora

El Cuadro 3 recoge los resultados de las ecuaciones anteriores y permite hacer algunas comparaciones.

La siguiente igualdad, que se cumple para los dos tipos de autobuses, se expresa a continuación:

$$\varepsilon = \frac{PR}{CI} = \frac{P_p * P}{P_j * F}$$

para el Trolebús:

$$141,8 = \frac{536 * 5.078.306}{0,267 * 718.483.448}$$

y para los autobuses a diesel:

$$8,2 = \frac{536 * 5.078.306}{0,08 * 4.140.922.118}$$

iii. Análisis de los resultados

Los resultados que se resumen en el Cuadro 3 ofrecen material abundante para formular una serie de reflexiones relacionadas con la eficiencia y la rentabilidad de los dos tipos de autobuses.

Un primer elemento es el análisis de la relación entre la eficiencia energética y la rentabilidad económica de los dos tipos de motores. La eficiencia energética o rendimiento termodinámico de los motores es la relación efectiva entre el producto obtenido y el insumo empleado, expresada en unidades energéticas. La rentabilidad económica es una razón similar, pues relaciona el producto y los insumos, pero medidos en unidades monetarias. De los datos se deduce que, para incrementar la rentabilidad monetaria de cualquiera de los dos sistemas de transporte, es necesario reducir la cantidad de insumos utilizados (F) o el

precio de los mismos (P). La reducción de los insumos (F) representaría también un incremento de la eficiencia energética del sistema ($\eta = P / F$). Es decir que, al reducir la cantidad de insumos consumidos, se estarían alcanzando dos objetivos fundamentales de un proceso económico entrópico: el aumento de la eficiencia energética y de la rentabilidad económica.

Al comparar los dos sistemas de transporte propuestos en este trabajo, se descubre un segundo aspecto interesante: la operación del sistema de autobuses a diesel es considerablemente menos rentable y menos eficiente que la de los autobuses de motor eléctrico. La diferencia en términos de rentabilidad se explica porque los autobuses de motor eléctrico consumen casi la sexta parte de la energía de la que consumen los autobuses de motor a diesel. El sistema de autobuses eléctricos es más rentable, incluso a pesar de que el precio de la energía eléctrica es 3,3 veces mayor al del diesel.

En los resultados del ejercicio, sorprende descubrir niveles tan altos de rentabilidad monetaria. Por ejemplo, para el caso del Sistema Trolebús, por cada sucre que se gasta en electricidad, se recuperan 141,8 sucres. Sin embargo, al hacer una lectura atenta de los datos se debe recordar que el modelo deja fuera todos los demás costos de operación (salarios, mantenimiento, y otros) de los sistemas de transporte.

Con respecto a la eficiencia energética, existe una diferencia considerable entre los dos tipos de motores. Mientras que el motor a diesel produce 0,0012 calorías por cada caloría que consume, esta relación es seis veces mayor para el caso del motor eléctrico. Es decir, el motor del Trolebús es seis veces más eficiente desde el punto de vista energético que el motor del autobús a diesel. Los efectos positivos de la eficiencia son altamente apreciados por la ciudadanía, que se beneficia de la eliminación de las emisiones de gases por combustión, del menor ruido y del decre-

mento de las vibraciones, consecuencias directas de la circulación de autobuses con motores eléctricos.

Cabe señalar el hecho de que los dos coeficientes de eficiencia energética (termodinámica) se mantienen en el límite propuesto por la TGAE, entre 0 y 1. Como se describió en el capítulo anterior, la explicación teórica de este coeficiente se encuentra en la segunda ley de la Termodinámica.

Un tercer elemento que destaca el ejercicio se refiere a L , la pérdida de calidad interna del sistema. En el ejercicio se aprecia que los autobuses con motor a diesel suponen una pérdida de calidad interna 2,9 veces mayor a la de los autobuses de motor eléctrico. La interpretación de esta variable permite comprender que los autobuses con motor a diesel aceleran el proceso entrópico a una mayor velocidad que los autobuses con motor eléctrico.

Un cuarto aspecto relaciona la interpretación de los resultados anteriores con los niveles de generación de residuos en uno y otro sistema. En el mismo Cuadro 3 se observa que los autobuses de motor a diesel generan 14,5 veces más residuos que los autobuses de motor eléctrico. Como se explicó, el uso de diesel en los motores de los autobuses supone procesos productivos con un ritmo más acelerado de degradación entrópica. En la práctica, este fenómeno se refleja en niveles más altos de generación de residuos materiales (partículas o humo) o energéticos (calor o ruido).

Finalmente, a partir de los datos anteriores, se explica la diferencia en el tamaño de la irreversibilidad de los dos procesos productivos. Como se describió en el capítulo 2, la irreversibilidad es una variable que cuantifica la degradación total provocada por la actividad productiva. En esta variable se integran las dimensiones tanto de la degradación entrópica del sistema, como de los residuos generados en el proceso productivo. El resultado

de estos dos elementos es un cambio cualitativo irreversible del sistema. Este cambio irreversible es casi seis veces mayor cuando se utilizan autobuses de motor a diesel.

Puesto que este análisis se centra en el funcionamiento de sistemas de transporte, es importante destacar un elemento relacionado al tipo de “producción” de un sistema de esta naturaleza. Un sistema de transporte produce un servicio que es valorado por la gente en la medida en que permite sustituir la necesidad de trasladarse de un lugar a otro caminando, o en otro medio de transporte alternativo. Sin embargo, cuando las personas toman la decisión de subir a un autobús, la función que buscan optimizar no es la minimización de su consumo calórico. La motivación de los usuarios de un sistema de transporte se relaciona con otro tipo de elementos que les brindan satisfacción. Por ejemplo, el tiempo que ahorran y la comodidad que experimentan al no tener que caminar para trasladarse de un lugar a otro.

Es probable que si se realizara un ejercicio similar para una ciudad que no cuenta con sistemas de transporte, el valor de la pérdida de calidad interna del sistema - en este caso, la ciudad - sería casi insignificante. Por ello, un sistema ideal sería aquel en donde todas las personas caminaran o emplearan bicicletas u otros medios de transporte, movidos por la propia energía endosomática humana, para trasladarse de un lugar a otro. Un transporte de este tipo supondría un deterioro entrópico insignificante para el sistema. Sin embargo, en una ciudad como Quito, es imposible prescindir del consumo exosomático de energía de los vehículos. La valoración social del tiempo y de la comodidad en el transporte es muy grande³. Por esta razón, no se puede dejar de dotar a la ciudad de un sistema de transporte. Lo que sí es indispensable analizar es la eficiencia energética y la rentabilidad económica del sistema que se va a emplear. En este sentido, el ejercicio aquí realizado proporciona valiosos elementos de análisis.

Es necesario reconocer que existen algunos aspectos que han quedado al margen de la reflexión presentada en los párrafos precedentes. Por ejemplo, la inversión inicial que supone la instalación de un sistema de autobuses eléctricos es mucho más alta pues requiere la instalación de postes y cables especiales para los autobuses. También existe una diferencia importante en el valor de cada unidad de transporte. Mientras cada Trolebús cuesta alrededor de US\$ 845.000 FOB, cada autobús Volvo B58 Articulado Intercooler de la misma capacidad cuesta US\$ 180.000 FOB (precios a marzo de 1997).

Adicionalmente y puesto que, en los primeros meses del año 1997, las autoridades han discutido un ajuste de las tarifas eléctricas para disminuir el subsidio al consumo de este tipo de energía, sería importante realizar un análisis de sensibilidad para estimar el cambio en los resultados obtenidos, con la utilización de las nuevas tarifas eléctricas que el gobierno anunció que deberían elevarse, al menos, de 230 a 400 sucres por kw/h para el Trolebús. Para conocer la sensibilidad de la demanda del servicio, se debería, además, incluir en otros análisis el efecto del alza del precio del pasaje del Trolebús (de 700 a 1.000 sucres la tarifa normal y de 400 a 500 sucres la tarifa especial) que se decretó en enero de 1997.

También cabe destacar un aspecto que se analizará con mayor profundidad en el siguiente ejercicio. Desde el punto de vista de la política ambiental, es necesario estudiar la forma de generación de la energía eléctrica empleada en el Sistema Trolebús y compararla con la generación del diesel. Si la electricidad que alimenta el Sistema Trolebús proviene de fuentes renovables (por ejemplo, las hídricas, como efectivamente lo hace), podría ser deseable favorecer un mayor consumo de este tipo de energía. Una forma de lograrlo sería a través de precios más elevados para la energía de origen fósil. En la actualidad sucede todo lo contrario: el mercado envía la señal equivocada pues el consumo

de electricidad de origen hídrico es más costoso que el de combustibles fósiles no renovables como el diesel.

Por último, es fundamental considerar que, por la falta de una política energética coherente y continua en el Ecuador, la provisión de energía hidroeléctrica ha estado sujeta a las condiciones climáticas. A fin de prever esta eventualidad, para casos de racionamientos eléctricos en ciertos barrios, el Sistema Trolebús cuenta con un mecanismo que le permite compensar la energía que falta en unas zonas con aquella que recibe de otras. Sin embargo, a pesar de que el sistema resuelve este problema, un análisis más completo no puede dejar al margen aspectos relacionados a la sustitución que realiza la Empresa Eléctrica Quito al dejar de generar hidroelectricidad y abastecerse de centrales térmicas, alimentadas, a su vez, por combustible fósil.

B. Aplicación de la Huella Ecológica

i. Supuestos y metodología

El objetivo de este apartado es aplicar la huella ecológica para evaluar los efectos de la instalación del sistema de autobuses eléctricos, el sistema Trolebús, alrededor del cual se articula la principal red de transporte norte-sur de la ciudad de Quito. Al igual que el ejercicio anterior, éste busca demostrar cómo la incorporación de instrumentos termodinámicos en el análisis económico permite ampliar y perfeccionar los criterios que, tradicionalmente, se emplean al evaluar algunos objetivos de los procesos productivos como la eficiencia, la rentabilidad y la maximización del bienestar de los consumidores.

Como se presentó en el segundo capítulo de este trabajo, la huella ecológica cuantifica el espacio ambiental, expresado en cantidad de suelo y agua, necesario para sustentar una actividad humana. La huella ecológica es útil pues permite comparar la in-

tensidad en el uso del espacio ambiental de diferentes procesos productivos. Este instrumento también ilustra la distribución del espacio ambiental entre los seres humanos con niveles de ingreso y formas de vida diferentes.

Detrás del concepto de la huella ecológica, se descubre un principio de equidad que sugiere que los habitantes del mundo deberían tener oportunidades iguales para acceder al espacio ambiental y sostener su supervivencia en el planeta. Las decisiones de asignación intertemporales se podrían llevar a cabo solamente dentro del espacio que “corresponde” a cada ser humano. Dada la superficie de la tierra, se calcula que existe alrededor de 1,5 hectáreas disponibles para proveer a cada persona de la tierra y agua que necesita para satisfacer sus necesidades de consumo y eliminar los residuos que produce. En un escenario ideal de equidad, las personas deberían tomar sus decisiones de ahorro, consumo e inversión conscientes de esta restricción espacial y sin violar los derechos de los demás de disponer de su “propia” tierra.

Las palabras entre comillas en el párrafo anterior ilustran un elemento importante de esta interpretación de la equidad. Al proponer que una cierta cantidad de espacio ambiental “corresponde” a una persona o al hablar del derecho de cada ser humano de disponer de su “propia” tierra, no se está sugiriendo la existencia de un derecho de propiedad sobre ese espacio. Por sus características, el derecho de propiedad es algo diferente. Los elementos de análisis que incorpora la huella ecológica enriquecen una lectura intertemporal del principio de la equidad, fundamental para el desarrollo sostenible (equidad intergeneracional).

El ejercicio que se desarrolla en las secciones siguientes busca identificar cómo cambiaría la huella ecológica del servicio de transporte de una parte de los habitantes de la ciudad de Quito si, en lugar del actual sistema de autobuses eléctricos, se hubie-

se instalado un sistema similar pero con autobuses de motor a diesel. Por tanto, el propósito de este análisis es encontrar el diferencial entre la huella ecológica (número de hectáreas de espacio ambiental consumido) de una flota de autobuses a diesel y la huella ecológica de un sistema de autobuses eléctricos para el circuito norte-sur del sistema integrado de transporte del Distrito Metropolitano.

Por tanto, para este análisis se mantendrán varios de los supuestos del ejercicio anterior:

1. Existe un carril exclusivo por el cual circulan los autobuses de motor eléctrico y a diesel.
2. El chasis y la carrocería de los dos tipos de autobuses son iguales, por tanto su capacidad es similar. Por la misma razón, tanto el Trolebús como el autobús de motor a diesel son igualmente cómodos y seguros.
3. El sistema de Trolebús es tan rápido como el de los autobuses de motor a diesel.
4. Las dos flotas de autobuses (a diesel y eléctricos) funcionan en condiciones similares en términos de velocidad y servicio al cliente.

Es importante considerar que, al igual que en el ejercicio anterior, el único insumo que entrará en el cálculo de la huella ecológica es la fuente de energía de uno y otro sistema de transporte. En este análisis se están ignorando los insumos materiales empleados en el mantenimiento de los autobuses y la infraestructura necesaria en uno y otro caso. Por ejemplo, no se toma en cuenta el consumo material para la construcción de los postes y cables que alimentan de energía al autobús eléctrico.

Rees y Wackernagel (1996) proponen una metodología para el cálculo de la huella ecológica de la población de una región. En este caso, no se va a calcular el total de la huella ecológica de la

población que vive en el Distrito Metropolitano de Quito. En las próximas secciones, se cuantificará el espacio ambiental que sostiene al sistema de transporte público utilizado por alrededor de un 11,7% de la población del Distrito Metropolitano.

Por último, para los fines de este análisis, es necesario tomar en cuenta el origen de la energía eléctrica que alimenta al sistema Trolebús. En teoría, el sistema debería funcionar durante todo el año con la electricidad de la presa hidroeléctrica de Paute. Sin embargo, los problemas de abastecimiento eléctrico que todos los años afectan al país obligan a emplear energía de origen térmico. En este ejercicio se trabajará con el supuesto de que el abastecimiento de energía hidroeléctrica funciona en condiciones ideales y no hace falta emplear energía termoeléctrica, cuyo consumo energético es más intenso e ineficiente que el de la hidroelectricidad.

ii. Desarrollo empírico

El tamaño de la huella ecológica de una región está relacionado tanto con la densidad con la que la población se distribuye en el territorio, como con el consumo exosomático de energía de esa sociedad. Los habitantes de regiones más densamente pobladas y con niveles de consumo material intensivos son incapaces de satisfacer sus necesidades materiales con los recursos de su propio territorio. Por tanto, deben apropiarse del espacio ambiental de personas que viven en regiones con menor presión sobre sus recursos naturales. En la práctica, este proceso se realiza a través del intercambio comercial entre las regiones y los países. Los resultados del trabajo de Rees y Wackernagel sobre los flujos de espacio ambiental en el mundo son impresionantes. El Cuadro 4 recoge algunos datos que permiten ilustrar las diferencias regionales en el uso del espacio ambiental.

Cuadro 4: Déficit Ecológico de los Países Industrializados

País	Tierra productiva (miles de hectáreas)	Población (1995, miles)	Tierra productiva per cápita	Déficit Nacional	
				hectáreas	% disponible
2-3 has de h. e.- p.c.¹					
Corea del Sur	8.716	45.000	0,19	1,81	950%
Japón	30.416	1.25.000	0,24	1,76	730%
3-4 has. de h. e.- p.c.					
Alemania	27.734	81.300	0,34	2,66	780%
Australia	575.933	17.900	32,18	-29,18	907%
Austria	6.740	7.900	0,85	2,15	250%
Bélgica	1.987	10.000	0,20	2,80	1.400%
Dinamarca	3.270	5.200	0,62	2,38	380%
Francia	45.385	57.800	0,78	2,22	280%
Gran Bretaña	20.360	58.000	0,35	2,65	760%
Holanda	2.300	15.500	0,15	2,85	1.900%
Suiza	3.073	7.000	0,44	2,56	580%
4-5 has. de h.e. - pc.					
Canadá	434.477	28.500	15,24	-10,94	-250%
Estados Unidos	725.643	258.000	2,81	2,29	80%

1: En este y en los demás casos se lee 2-3 hectáreas de huella ecológica per cápita.

Fuente y elaboración: Rees y Wackernagel, 1996: 97.

En el Cuadro 4, se ha clasificado a un grupo de trece países industrializados en tres categorías, de acuerdo a su huella ecológica (de 2-3, 3-4 y 4-5 hectáreas per cápita). Además, se ha calculado la cantidad de tierra ecológicamente productiva disponible en cada uno de esos países y se la ha comparado con la población que se sostiene en ese territorio. El déficit ecológico de los países es producto de esos dos datos y se ha expresado en hectáreas y en porcentaje de tierra disponible.

Es interesante descubrir que once de los trece países del Cuadro 4 son deficitarios ecológicamente. Es decir, la mayor parte de su consumo material y energético depende de otras regiones. Estos países son importadores netos de espacio ambiental. Por el contrario, únicamente Canadá y Australia, los dos países con la densidad de población más baja de la muestra, pueden sostener su consumo ecológico a partir de los recursos de su propio territorio.

Con relación a la situación de América Latina, es interesante ampliar un poco más la información sobre la disponibilidad de recursos:

“Con el 8,5% de la población mundial, la región posee el 23% de las tierras potencialmente arables, el 12% de las tierras de cultivo actuales y el 17% de las pasturas. Igualmente posee el 23% de los bosques del planeta y 46% de los bosques tropicales, tiene el 31% del agua utilizable y, aunque solo cuenta con el 3% de las reservas de combustibles fósiles, posee el 19% del potencial hidroeléctrico mundial” (Claude, 1996: 1).

Esta información permite visualizar que, en términos de distribución de los recursos naturales mundiales, la región latinoamericana es privilegiada. Con excepción de su dotación de combustibles fósiles, en todos los demás recursos, América Latina cuenta con una dotación per cápita mayor a la unidad. Esta

riqueza que caracteriza a la región la convierte en una zona estratégica, desde el punto de vista de la sostenibilidad ecológica y económica mundial.

Los datos presentados en este capítulo sobre la distribución mundial de los bienes ambientales se prestan para formular múltiples interpretaciones políticas, económicas y comerciales. Sin embargo, se trata de un tema que desborda los límites de este trabajo. A pesar de ello, sí interesa destacar la importancia de los dos determinantes de la huella ecológica de un territorio: su densidad de población y su consumo exosomático de energía. Estos dos factores, que se ilustran claramente en el Cuadro 4, aparecerán frecuentemente en el análisis posterior. Antes de proceder con el ejercicio, es importante subrayar que tanto el tamaño de la población como las preferencias de los individuos, que se expresan en su consumo exosomático de energía, son variables de política sobre las cuales las autoridades pueden tener alguna influencia. Por tanto, vale la pena comenzar el análisis del sistema de transporte de Quito recordando que, efectivamente, la huella ecológica es una variable que puede ser controlada por los seres humanos.

El Cuadro 5 compara el espacio disponible per cápita, expresado como la inversa de la densidad de población, en hectáreas por habitante, para diferentes regiones. El objetivo de este cuadro es ilustrar las diferencias que se presentan si el análisis se realiza a escala local (en este caso urbano), nacional, regional y mundial.

Cuadro 5: Espacio Disponible per Cápita

Región	Extensión (hectáreas)	Población (personas)	Espacio per cápita (hectáreas/ persona)
Distrito Metropolitano	421.498	1.715.601	0,25
Ecuador	27.067.000	11.300.000	2,40
América del Sur	688.063.700	299.900.000	2,29
América	3.111.591.700	735.700.000	4,23
Europa	1.053.075.000	684.400.000	1,54
Asia	4.448.590.000	3.317.800.000	1,34
Africa	3.026.968.000	654.600.000	4,62

Fuentes: 1) Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, *Información Básica sobre el Distrito Metropolitano de Quito y su Municipalidad*, Abril de 1997; 2) *Atlas Ilustrado de Nuestro Mundo*, National Geographic y El Comercio, 1994.

Elaboración: La autora

Los datos del Cuadro 5 permiten apreciar las diferencias en la densidad de población de las distintas regiones del mundo. Sin embargo, estos valores no reflejan el espacio ambiental disponible en cada uno de estos territorios. El espacio ambiental es un concepto algo más complejo que el territorio, pues incorpora un factor cualitativo que diferencia a los territorios: su calidad ambiental. Este factor es evidente, por ejemplo, para el caso africano, en donde gran parte del territorio continental es desértico y, por tanto, su productividad ambiental es mínima. A pesar de que los datos del Cuadro 5 se encuentran afectados por esta distorsión, éstos permiten apreciar algunas de las regiones en donde la presión de la población sobre los recursos es más intensa.

Un elemento adicional que es importante destacar del Cuadro 5 es la diferencia que existe entre el espacio disponible per cápita en el Distrito Metropolitano de Quito y en las demás regiones del mundo. Este dato refleja un aspecto fundamental en

el estudio de la huella ecológica: generalmente, las áreas urbanas son deficitarias en espacio ambiental y por tanto, se apropian del espacio ambiental de regiones rurales menos habitadas. Es decir, las áreas urbanas son importadoras netas de espacio ambiental y, por consiguiente, su huella ecológica es mayor al espacio ambiental de la propia ciudad.

Una vez expuestas las reflexiones anteriores, es posible presentar el cálculo de la huella ecológica para las dos alternativas de transporte elegidas en este trabajo, siguiendo la metodología propuesta por Rees y Wackernagel. Los datos que se emplearán en el ejercicio se derivan de los que se utilizaron en el ejercicio anterior y se resumen en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Variables de la Huella Ecológica

DATO (unidades) / TIPO DE AUTOBÚS	MOTOR ELECTRICO	MOTOR A DIESEL
Usuarios mensuales (número de personas)	4.415.918	4.415.918
Insumo energético consumido, IEC (Kcal)	718.483.448	4.140.922.118
IEC per cápita (Kcal / persona)	162,7	937,7
Productividad de generación de la energía que alimenta cada tipo de motor (Kcal / hectárea) ³	23,9 x 10 ⁷	2,07 x 10 ⁷

Fuentes: 1) Unidad Operadora del Sistema Trolebús; 2) Rees y Wackernagel, 1996: 69.

Elaboración: La autora.

Calcular el consumo per cápita del bien en cuestión: Cada mes, el sistema de transporte de autobuses de motor eléctrico consume alrededor de 162,7 kilocalorías de energía por usuario mientras que los autobuses de motor a diesel consumen 937,7 kilocalorías por usuario.

En este ejercicio, para el cálculo de la huella ecológica, se trabajará exclusivamente con el consumo energético de los sistemas de transporte y no con su generación de desechos. La razón a la que obedece esta decisión es que el interés principal de este ejercicio consiste en comparar los dos sistemas de transporte en términos de su uso de energía. Abordar aspectos adicionales del proceso – como, por ejemplo, la generación de residuos – complica la metodología pues exige realizar un análisis del ciclo de vida del producto. Además, implícitamente, los coeficientes de productividad (número de hectáreas necesarias para obtener una unidad de energía) toman en cuenta las emisiones producidas por los motores a diesel pues estos coeficientes se estimaron a partir del espacio ambiental necesario para secuestrar las emisiones de CO₂ generadas por la quema de hidrocarburos.

Por las razones anteriores, se supuso que la generación de ruido y calor -residuos de uno y otro sistema- es similar con cualquiera de los tipos de autobuses. De acuerdo con este supuesto, no se tomó en cuenta al principal tipo de residuos generados por el sistema de autobuses eléctricos. Finalmente, al igual que lo hacen Rees y Wackernagel en su estudio, en este trabajo se ignoraron otras emisiones distintas a las de CO₂ (partículas, SO₂, NO₂ y otras) no solamente por la dificultad que supone cuantificar el espacio ambiental necesario para asimilar estas sustancias, sino también porque la contribución del carbono al efecto invernadero es, en la actualidad, uno de los principales problemas ambientales que amenaza a la humanidad.

Estimar el tamaño de la superficie de la que se apropió cada consumidor del bien: Esto se realiza dividiendo el consumo per cápita de energía para transporte (en kilocalorías mensuales por usuario) para la productividad de la generación de cada una de esas formas de energía (en kilocalorías por hectárea). Empleando los coeficientes de productividad del Cuadro 6, que son 1.000 gigajoules o $23,9 \times 10^7$ kilocalorías por hectárea para la

energía hidroeléctrica y 86,7 gigajoules o $2,072 \times 10^7$ kilocalorías por hectárea para la energía fósil (valor promedio de los resultados de los diferentes métodos sugeridos por los autores), se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 7: Superficie Mensual Apropriada por cada Usuario del Sistema de Transporte

Autobuses de motor eléctrico	$6,8 \times 10^{-7}$ hectáreas por usuario
Autobuses de motor a diesel	$452,6 \times 10^{-7}$ hectáreas por usuario

Elaboración: La autora.

Los valores expresados en el Cuadro 7 constituyen la huella ecológica mensual per cápita de los usuarios de cada sistema de transporte.

Obtener la huella ecológica promedio de la población: En este caso hay que calcular la huella ecológica de la población de usuarios de cualquiera de los dos sistemas de transporte público. Este valor se encuentra multiplicando la superficie apropiada por cada usuario del sistema de transporte por el número total de usuarios de cualquiera de los dos sistemas. El producto de esta operación se resume a continuación:

Cuadro 8: Huella Ecológica Promedio de la Población que Usa el Sistema de Transporte Público

Autobuses de motor eléctrico	3 hectáreas por mes 36 hectáreas por año
Autobuses de motor a diesel	199,8 hectáreas por mes 2.397,6 hectáreas por año

Elaboración: La autora.

De los datos del Cuadro 8, es posible calcular el diferencial que existe en la huella ecológica de un sistema de transporte alimentado por diesel y otro alimentado por electricidad. La reducción de la huella ecológica de los habitantes del Distrito Metropolitano de Quito, al emplear el sistema Trolebús y no un sistema similar con una flota de autobuses a diesel, es de 197,8 hectáreas por mes y 2.361,6 hectáreas por año, es decir, de un 98,5%. El resultado tiene mayor interés si se considera que la reducción de la huella ecológica anual representa una superficie equivalente al 0,57% del territorio del Distrito Metropolitano de Quito⁴.

iii. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en el apartado anterior deben interpretarse tomando en cuenta la extensión del espacio del Distrito Metropolitano de Quito que corresponde a los usuarios del sistema de transporte, es decir, al 11,7% de la población. Se hace referencia a alrededor de 49.315 hectáreas de terreno que, por sus características naturales y su uso actual, no se puede calificar *a priori* como espacio ambiental. Sin embargo, para los fines de este trabajo se supondrá que ese tamaño de terreno proporciona una idea aproximada de la distribución del espacio entre los habitantes del Distrito Metropolitano de Quito.

Es interesante descubrir que la huella ecológica anual de un sistema de transporte con autobuses de motor a diesel (2.397 hectáreas por año) es el 4,86% del tamaño total del espacio del que podría apropiarse el 11,7% de la población del Distrito Metropolitano. Por su parte, el espacio ambiental del que se apropia el sistema de autobuses eléctrico es de 36 hectáreas por año, y esto representa sólo el 0,073% del espacio correspondiente a la población de usuarios del servicio de transporte.

Si se comparan los consumos anuales de espacio per cápita con las 1,5 hectáreas que Rees y Wackernagel sugieren que de-

berían estar disponibles para cada habitante del planeta, se observa que el sistema de autobuses de motor a diesel consume anualmente un 0,093% del espacio disponible para esa población, mientras que los usuarios de autobuses eléctricos consumen apenas 0,0014% del espacio que corresponde a esas personas. La diferencia entre los datos presentados en este párrafo y los del anterior se explica por el menor espacio ambiental per cápita disponible en el área del Distrito Metropolitano de Quito.

Una vez más, este ejercicio permite verificar que el sistema de autobuses de motor eléctrico cumple con condiciones muy favorables desde el punto de vista de la sustentabilidad. La sustitución de autobuses de motor a diesel por autobuses eléctricos presenta una enorme ventaja ambiental, tanto por la menor intensidad energética, como por la mayor eficiencia del sistema. Es probable que muchos de los beneficios sociales que proporciona este cambio no sean evidentes para la ciudadanía. Por esta razón, el Municipio de Quito debería emprender una gran campaña informativa que fortalezca el apoyo ciudadano hacia el sistema Trolebús y por tanto, proporcione una base política que reconozca la urgencia de acelerar el proceso de ampliación de éste.

Desde el punto de vista de las prioridades de la autoridad local, el ejercicio ilustra otros elementos que deberían estar en su agenda política. En primer lugar, es importante controlar el crecimiento de la población del Distrito Metropolitano de Quito para disminuir tanto la presión regional sobre los recursos naturales como sobre la dotación de servicios públicos⁵. Segundo, con el fin de reducir la congestión de pasajeros de una zona de la ciudad a otra, es necesario racionalizar el uso del suelo para minimizar la necesidad de la gente de transportarse grandes distancias varias veces al día. Este conflicto es especialmente sensible en una ciudad larga y estrecha como Quito. Tercero, los ciudadanos necesitan nuevos incentivos que favorezcan el uso de medios de transporte con consumos energéticos menos intensos. El Muni-

cipio debería estudiar la posibilidad de establecer rutas exclusivas para bicicletas, al menos en la dirección Norte - Sur, en la que la topografía es más regular. De considerarse esta una política adecuada para la ciudad, las autoridades deberían brindar facilidades de señalización y seguridad que estimulen a la población a emplear este tipo de transporte.

Un elemento de tensión interesante, que ha surgido en el análisis de los datos, es el hecho de que la huella ecológica tendría que tratarse como un instrumento dinámico. Sin embargo, el espacio ambiental disponible per cápita, el parámetro de comparación con el que se ha trabajado, es un indicador estático. Para ilustrar este conflicto, es conveniente presentar un ejemplo. Según Rees y Wackernagel, cada habitante de la tierra tiene derecho a consumir 1,5 hectáreas de espacio ambiental para sostener su consumo material. Un quiteño medio que emplea autobuses de motor a diesel consume 0,00139 hectáreas cada año para satisfacer sus necesidades de transporte. ¿Es sostenible este nivel de apropiación de espacio ambiental? Para contestar esta pregunta, es necesario conocer cuánto tiempo se tardará en recuperar el espacio ambiental consumido por la población. Sin embargo, la velocidad de regeneración del espacio ambiental difiere en las distintas latitudes y depende de varios factores geográficos, económicos e incluso políticos.

Como se ilustra en este ejemplo, el análisis de Rees y Wackernagel debería profundizar el estudio del factor tiempo pues esta es una variable fundamental al abordar el tema de la sustentabilidad de las actividades humanas. Si se establece que cada habitante del planeta tiene derecho a consumir un espacio ambiental de 1,5 hectáreas, hablar de sustentabilidad exige considerar el ritmo al que se deteriora ese espacio y la velocidad a la que tiene capacidad de regenerarse. Para resolver esta deficiencia, podría calcularse una tasa de crecimiento ponderada para el espacio ambiental del mundo. Esta tasa permitiría compatibilizar los da-

tos de huella ecológica anual de una actividad humana, por ejemplo, con el espacio ambiental disponible para esa población en un espacio intertemporal.

En esta misma línea de reflexión, es importante anotar que la capacidad tecnológica es la principal variable que determina cuánto se puede extraer del espacio ambiental. En este ejercicio se apreció cómo un avance tecnológico – el autobús de motor eléctrico- supuso una reducción de la presión del sector del transporte sobre el espacio ambiental y, por el contrario, liberó una cantidad de espacio disponible para otros usos. Desde esta perspectiva, a pesar de que hay numerosos determinantes sociales y culturales que establecen las necesidades materiales de la sociedad (su consumo exosomático de energía), desde el punto de vista de la sustentabilidad, la tecnología debería ser la que establezca los límites máximos para los ritmos de consumo de los recursos naturales.

A gran escala, este mismo problema que se ha identificado en el ejercicio, es el principal dilema del conflicto ambiental en el mundo. Los ritmos de consumo y degradación de los recursos naturales difieren enormemente entre los habitantes de la Tierra. Una parte de la población mundial sólo puede mantener sus niveles de consumo material a costa de que, para la gran mayoría de las personas, no sea materialmente posible acceder a similares formas de vida y niveles de consumo. Por tanto, unos pocos habitantes del planeta se apropian de una porción del espacio ambiental al que, se supone, todas las personas deberían tener derecho. Esa transferencia, que sostiene el consumo material de unos, no es compensada de ninguna manera a quienes resultan exportadores netos de espacio ambiental y se convierten en perdedores.

De igual manera, este análisis debería incorporar no sólo un concepto de equidad intrageneracional como el expuesto en

los párrafos anteriores. Si la población del mundo se encuentra permanente y rápidamente en expansión, es indispensable asegurar la capacidad del planeta de brindar oportunidades similares para satisfacer sus necesidades materiales a las generaciones futuras. Una vez más, los ritmos de degradación y reposición del espacio ambiental son las variables que entran en conflicto con el crecimiento de la población de la tierra y de sus niveles de consumo.

En este punto, es interesante plantear una interpretación del tema del desarrollo propuesta por un grupo de economistas chilenos, cuyo trabajo fue citado en el capítulo 2 de este trabajo, Saar Van Hauwermeiren y Bert de Wel. Estos autores proponen que el subdesarrollo se caracteriza por el intercambio o la sustitución de productos con un tiempo de reposición largo o infinito - como el combustible fósil, la fertilidad del suelo o la diversidad biológica - por otros de manufactura rápida (1995: 1). En su trabajo, sugieren que, desde el punto de vista de la sustentabilidad, unos y otros productos no pueden tratarse como bienes sustitutos. Por el contrario, sus precios deben reflejar los incentivos adecuados que permitan consumirlos de manera sostenible. Por tanto, las políticas económicas tendrían que favorecer el uso intensivo de productos que pueden fabricarse rápidamente (recursos renovables) y castigar a través de los precios, el consumo de productos cuya reposición se realiza en períodos largos (recursos no renovables). Como se aprecia en el ejercicio realizado y se lo hará también en el siguiente capítulo, en el Ecuador los incentivos económicos para el consumo energético todavía no se han orientado en la dirección apropiada.

NOTAS

- 1 Esta aclaración es importante puesto que el análisis no se ha concentrado en el ciclo de vida de uno y otro tipo de autobús sino que se ha limitado a analizar el consumo energético de su operación. Podría argumentarse que se trata de un estudio incompleto, puesto que más de la mitad de la energía que esta actividad consume, lo hace en otras etapas del ciclo del transporte: la fabricación del vehículo, la construcción de infraestructura de circulación, etc. Aunque en este estudio se ha considerado sólo una parte pequeña del ciclo de transporte, el análisis expuesto se justifica en la medida en que la operación de los autobuses representa primero, al menos el 40% restante del consumo energético a lo largo de la vida útil de la máquina y segundo, supone un costo o un beneficio externo diario para un sector de población muy amplio (Antonio Estevan y Alfonso Sanz).
- 2 Es necesario destacar que el subsidio al consumo eléctrico constituye una distorsión sobre la información que proporcionan estos precios. Más adelante se analizarán los efectos de este fenómeno.
- 3 Un dato interesante que permite apreciar los niveles de consumo energético en el transporte es el siguiente: si la población que emplea este servicio de transporte público se movilizase en vehículos particulares (para esta estimación se supuso que se utilizarían Suzuki Forza, de modelos de no más de cinco años de antigüedad), se consumiría 2,6 veces más energía que con el sistema de autobuses eléctricos y 15,1 veces más energía que con los autobuses de motor a diesel. Sin lugar a dudas, se trata de una situación extrema y en la práctica imposible pues no se podría sostener un incremento en el tráfico de la ciudad de alrededor de 30.000 vehículos. Lo que sí se ilustra a través de estos datos son las desigualdades que existen en el consumo de energía entre los habitantes del Distrito Metropolitano.
- 4 Repitiendo el caso extremo presentado en una nota de la sección anterior, si en lugar de utilizar el transporte público, los usuarios de los autobuses se movilizasen en vehículos particulares (Suzuki Forza, de no más de cinco años de antigüedad), el tamaño de su huella ecológica sería 524 veces mayor a la que se consume empleando autobuses eléctricos y 2,6 veces más grande que la huella ecológica del sistema de transporte de vehículos con motores a diesel. Una vez más, estos datos permiten demostrar el desigual consumo de espacio ambiental en la ciudad.
- 5 A pesar de que esta tarea rebasa la competencia y la capacidad de control de la autoridad local, a través del Municipio se puede presionar por políticas de Estado de control del crecimiento de la población.

4. LECTURA DE LOS COEFICIENTES TÉCNICOS DE LA MATRIZ INSUMO-PRODUCTO A PARTIR DE UNA APLICACIÓN ECONÓMICA DE LA LEY DE LA ENTROPÍA

Después de haber constatado la utilidad del análisis termodinámico en un estudio comparativo de naturaleza microeconómica, en este capítulo se regresa a los elementos teóricos, presentados en el capítulo 2, para abordar un tema de la macroeconomía. Siguiendo la línea general de este trabajo, el propósito del ejercicio que se realiza a continuación es ilustrar cómo los elementos que introduce el análisis termodinámico en la ciencia económica plantean nuevos problemas teóricos. En particular, el instrumento de análisis que se emplea en este capítulo es la Matriz Insumo-Producto de las Cuentas Nacionales.

Este capítulo tiene dos partes. En la primera, se desarrolla un ejercicio empírico para explorar las posibilidades de estudio que ofrece la información sobre uso de la energía en los procesos productivos que proporciona la Matriz Insumo-Producto. En la segunda parte, se discuten algunas limitaciones que - a la luz de la termodinámica - presenta la Matriz Insumo-Producto como instrumento de representación de los procesos productivos.

A. Análisis empírico

El objetivo de estos ejercicios es examinar la evolución que han experimentado los coeficientes técnicos de algunos produc-

tos de la MIP entre los años 1992 y 1995. Una vez analizado el caso ecuatoriano, se presentan varias reflexiones sobre la posibilidad de observar innovaciones tecnológicas como respuesta a cambios en los precios de la energía en el corto, mediano y largo plazo. Finalmente, se utilizan los resultados obtenidos para compararlos con parámetros internacionales, que permiten identificar algunas características del uso energético en el aparato productivo nacional.

i. Energía, ¿para qué?

La primera tarea para iniciar este ejercicio es identificar las ramas productivas que emplean energía con mayor intensidad en el Ecuador. Para los fines de este trabajo, se han definido como productos energéticos aquellos que proporcionan la energía eléctrica o el combustible que permiten el funcionamiento de otros sectores. De acuerdo a la clasificación presentada en la MIP ecuatoriana, se acogen a la presente definición de productos energéticos los que se agrupan bajo las siguientes categorías: *petróleo y gas natural* (06)¹, *productos de la refinación de petróleo* (07) y *electricidad, gas y agua* (22).

El cuadro que se presenta en el Anexo 1, al final de este trabajo, fue construido siguiendo la estructura básica de las Cuentas Nacionales; en las tres primeras filas reproduce los valores de los tres productos energéticos que las distintas ramas productivas (representadas en las columnas) emplean como insumos; los datos están expresados en millones de sucres corrientes y corresponden al año 1995; la última columna presenta la suma total del valor de los productos energéticos que se destinó al consumo intermedio.

Inmediatamente, debajo de las tres primeras filas, se calcula la participación de cada una de las ramas productivas en la

demanda total por estos insumos. Estos coeficientes se expresan como porcentajes y son el objeto principal del análisis.

Antes de proceder al estudio de los datos del Anexo 1, se ha construido una tabla que recoge los resultados generales de este cuadro y que constituye un punto de partida bastante útil. Al igual que en el Anexo 1, los valores están expresado en millones de sucres corrientes y corresponden al año 1995. En la última columna del Cuadro 9, se presentan los valores del total de la oferta nacional de productos energéticos. Del total de esa oferta, en la segunda y tercera columnas se ilustra la cantidad del producto que se comercia en el mercado nacional, sea como consumo intermedio o como consumo final.

Cuadro 9: Estructura del Consumo de los Productos Energéticos

PRODUCTOS ENERGÉTICOS	Consumo Intermedio	Consumo Final	Oferta Total
Petróleo y Gas Natural	1.385.544 27,1%	0 0%	5.104.711
Productos de la Refinación de Petróleo	2.603.727 78,8%	690.860 20,9%	3.303.816
Electricidad, Gas y Agua	749.082 64,2%	417.897 35,8%	1.166.979

Fuente: Cuentas Nacionales del Ecuador No. 18 - 1996.

Elaboración: La autora.

En el Cuadro 9 se observa que de todo el *petróleo y gas natural* que se extrae, un 27,1% se emplea como insumo en el mercado interno. El resto se destina al mercado internacional. Es decir, el total de *petróleo y gas natural* que entra al mercado interno se utiliza como consumo intermedio de otras actividades productivas. A su vez, un 99,7% de los *productos de la refinación de petróleo* permanecen en el mercado interno. La mayor parte

de estos productos (78,8%) constituye consumo intermedio de otras actividades productivas y tan solo un 20,9% representa el consumo final de los hogares. Finalmente, la *electricidad, gas y agua* son consumidos, en su totalidad, dentro del mercado interno y, al igual que los *productos de la refinación de petróleo*, su principal destino es servir de consumo intermedio para otras actividades productivas. Los resultados de este cuadro permiten verificar el planteamiento que se propuso antes: los productos energéticos sirven, sobre todo, como insumos para otras ramas de la producción.

Con respecto a los encadenamientos productivos que se identifican a partir de la estructura de consumo de productos energéticos, para el caso del *petróleo y gas natural* se destaca que, prácticamente, la totalidad de su producción que se destina al mercado interno (98,7%), es empleada por la rama de *productos de la refinación del petróleo*. De ahí que estas dos ramas productivas tengan fuerte una interrelación.

Una vez que el *petróleo y gas natural* pasan por el proceso de refinación, se convierten en los *productos de la refinación del petróleo*. Estos bienes constituyen un insumo importante sobre todo para las siguientes ramas productivas: *transportes; electricidad, gas y agua; productos de la refinación de petróleo; pesca y caza; minerales básicos metálicos y no metálicos; e industria química y del caucho*.

La rama productora de servicios de *transporte* es la principal usuaria de los *productos de la refinación de petróleo*. El 44,4% de estos productos sirve como insumo de la actividad de transporte. De acuerdo a la importancia de su participación en la demanda interna total, las siguientes compradoras de *productos de la refinación de petróleo* son dos ramas que elaboran productos energéticos (*electricidad, gas y agua y productos de la refinación del petróleo*, en ese orden). En el Ecuador, un 41,2% de la capa-

cidad instalada para generación de electricidad depende de fuentes térmicas que emplean derivados de petróleo. A pesar de ello, solo el 19,2% de la generación de electricidad efectiva proviene de esas plantas (OLADE, 1996)². Además, como se desprende del Cuadro 9, los *productos de la refinación de petróleo* son también empleados como insumo en esta misma rama productiva.

Las ramas de *pesca y caza, minerales básicos metálicos y no metálicos e industria química y del caucho* también emplean intensamente *productos de la refinación de petróleo*. Su participación en el mercado de insumos derivados de petróleo fluctúa entre el 5,5% y el 6,2%. Estas cifras muestran que constituyen encadenamientos productivos importantes.

Finalmente, el usuario principal de *electricidad, gas y agua* es, curiosamente, este mismo sector. Es interesante identificar que varios de los demás sectores económicos que tienen una participación importante en el consumo de *electricidad, gas y agua* son productores de servicios. Como se aprecia en el Anexo 1, los *servicios gubernamentales, el comercio y los servicios a los hogares* constituyen un 25,5% de los consumidores de *electricidad, gas y agua*. Por su parte, sectores industriales que fabrican *productos minerales metálicos y no metálicos y textiles, prendas de vestir y productos de cuero* emplean un 15,2% del total de *electricidad gas y agua*, como consumo intermedio.

ii. Trayectoria de la (in)eficiencia en el consumo de energía

Gran parte de los análisis que se elaboran a partir de la Matriz Insumo-Producto emplean la matriz de coeficientes técnicos. El coeficiente técnico es la relación que existe entre el consumo intermedio y la producción total de un sector³. Refleja los requerimientos directos de insumos para la elaboración de un producto. Estos insumos se cuantifican a través de las compras que cada sector realiza de los otros. Se asume que los coeficien-

tes técnicos son constantes en el corto plazo y homogéneos para cada rama productiva. Tal como se anticipó en la presentación del capítulo, el objetivo de este ejercicio es analizar la evolución de los coeficientes técnicos de los productos energéticos de la MIP.

El cuadro que se reproduce en el Anexo 2 también se ha construido siguiendo la estructura fundamental de la MIP. En las filas se presentan los tres productos energéticos que son el objeto de este estudio. En las columnas están representadas las ramas de la producción. Los números en los casilleros muestran el valor de cada producto que cada rama consumió como insumo para su propia producción. Es importante resaltar que, a diferencia de la forma en que se organizan los datos en la MIP de las Cuentas Nacionales, en este cuadro los datos se expresan en millones de sucres constantes y debajo de cada producto, se presenta la serie 1992-1995. La forma como se han ordenado los datos en el cuadro permitirá, más adelante, visualizar la evolución de los coeficientes en el período estudiado.

Inmediatamente debajo de las filas con las series de datos, se encuentran los valores del total de la producción de cada una de las ramas económicas. Por fin, en la parte inferior del cuadro, se han calculado los coeficientes técnicos relacionados con el consumo de productos energéticos dividiendo el consumo intermedio de estos productos para el total de la producción de cada rama.

Para identificar la evolución de los coeficientes técnicos, se ha evaluado la trayectoria que éstos tuvieron en las ramas que son las principales consumidoras de productos energéticos. En el caso del primer producto energético, *petróleo y gas natural*, un 99% de su producción sirve como insumo para la rama que refina ese producto. En esta rama, la evolución de los coeficientes técnicos muestra un claro aumento en la productividad. Los gas-

tos en insumos por unidad producida se redujeron, entre 1992 y 1995, en 32,5 puntos porcentuales. Es interesante destacar que las restantes dos ramas, que también son usuarias (aunque muy modestas, con una participación del 1% en el total del producto) de *petróleo y gas natural*, mantienen esa misma tendencia en su productividad. Evidencia de esta afirmación se encuentra al examinar la evolución de los coeficientes técnicos en la rama de *productos de la refinación del petróleo* y en la de *electricidad, gas y agua*.

La trayectoria de los coeficientes técnicos en este sector refleja un cambio importante en la estructura productiva de la rama de *productos de la refinación de petróleo*. Sin embargo, es necesario reconocer que, de todos los coeficientes técnicos que aparecen en el cuadro, los que relacionan al *petróleo y gas natural* como insumos de la refinación de petróleo son los únicos mayores al ciento por ciento. Esto quiere decir que en 1995, que fue el año de mayor productividad, para elaborar un sucre de *productos de la refinación de petróleo*, fue necesario gastar 1,65 sueres en insumos. Estos datos reflejan una estructura de costos que sólo podría ser admisible en una actividad productiva subsidiada por el Estado.

Con relación al consumo de los *productos de la refinación de petróleo*, se analiza la evolución de la productividad en las ramas que, en el ejercicio anterior, se identificaron como las que más aprovechan de estos productos, que son en orden de importancia: el *transporte*; la *electricidad, gas y agua*; los mismos *productos de la refinación de petróleo*; la *pesca y caza*; los *minerales básicos metálicos y no metálicos*; y la *industria química y del caucho*.

Para el caso del *transporte*, los coeficientes técnicos reflejan una trayectoria bastante estable de la productividad, expresada en términos del uso de combustibles. La MIP no muestra

cambios considerables entre los años 1992 y 1995 en términos de la estructura tecnológica de esta actividad.

Por su parte, los coeficientes técnicos de *productos de la refinación de petróleo* que representan su autoconsumo observan un rápido incremento de la productividad durante el período 1992-1995. En este lapso, la productividad de la rama aumentó casi al doble; esto se demuestra en que los coeficientes técnicos se redujeron de 29,66% a 16,8%.

La trayectoria de la productividad de la rama que produce *electricidad, gas y agua* permaneció relativamente constante durante el período analizado. En el año 1995 se observó un ligero descenso⁴. Los coeficientes técnicos de las ramas de *pesca y caza, minerales básicos metálicos y no metálicos e industria química y del caucho* también tuvieron trayectorias estables.

En términos generales, se comprueba que el aparato productivo nacional no experimentó mayores presiones para mejorar su productividad relativa al uso de *productos de la refinación de petróleo*. Para encontrar explicaciones a este fenómeno, sería importante evaluar la elasticidad precio de la demanda de combustible. Una interpretación *a priori*, a partir de la información que proporciona la MIP, permite sugerir que, a pesar de la permanente elevación de los precios de los combustibles, ellos no han constituido un incentivo suficiente para utilizar con mayor eficiencia estos productos⁵. Podría suponerse además que este tipo de comportamiento se deriva de una curva de demanda inelástica, con escasa capacidad de respuesta a cambios en los precios, característica de bienes esenciales y difíciles de sustituir. En la secciones siguientes, se amplía el análisis del cambio tecnológico como respuesta a la estructura de precios.

Finalmente, con relación al consumo intermedio de *electricidad, gas y agua*, las ramas económicas que emplean este in-

sumo más intensamente son las siguientes (en orden de importancia y de acuerdo al ejercicio del apartado anterior): a) *electricidad, gas y agua*; b) *servicios gubernamentales*; c) *productos minerales metálicos y no metálicos*; d) *comercio*; e) *servicios a los hogares*; y f) *textiles, prendas de vestir y productos de cuero*.

La evolución de los coeficientes técnicos de todas estas ramas productivas muestra una trayectoria estable. Los cambios observados son insignificantes y es arriesgado derivar conclusiones a partir de ellos. Por esta razón, es posible plantear una explicación en una línea parecida a aquella de los *productos de la refinación del petróleo*. En todo caso, las variaciones producidas en el consumo de electricidad tienen relación con la falta de disponibilidad permanente de este tipo de energía, asociada a factores climáticos que determinan el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.

La productividad de los bienes energéticos que se venden al público (es decir, los *productos de la refinación de petróleo y la electricidad, gas y agua*), en los que tradicionalmente hubo una política de precios controlados que ha ido desapareciendo en los últimos años, muestra pocos cambios en el período analizado. Puede proponerse que esto se debe a que no existieron incentivos para incrementar la productividad. Sin embargo, es necesario un estudio más profundo de las causas que llevaron a que los coeficientes técnicos se comporten de aquella manera. En apartados siguientes, se profundiza, en alguna medida, en esta reflexión.

iii. Análisis de los resultados

Tras haber realizado el ejercicio empírico propuesto, es importante recoger los resultados observados e interpretarlos dentro del marco teórico de referencia de este trabajo: la importancia del análisis termodinámico para el estudio económico de

los procesos productivos. Por esta razón, a continuación se presentan algunas reflexiones que se han derivado del ejercicio.

El Cuadro 10 se ha elaborado con el objeto de resumir los resultados del Anexo 1. Siguiendo la estructura fundamental del Anexo 1, el Cuadro 10 recoge sólo los coeficientes de participación de los principales sectores que emplean productos energéticos como insumos. Por razones de espacio, en lugar de escribir los nombres de las ramas y productos, se presentan los códigos empleados en la MIP y en los cuadros de los anexos a este trabajo. Las referencias se encuentran en la parte inferior del Cuadro 10.

Cuadro 10: Participación en el Consumo de los Principales Usuarios de Productos Energéticos

Producto/ Rama	05	06	07	12	15	18	19	22	24	25	31	32	TOTAL
06		1,0	98,8					0,2					100
07	6,2	1,0	7,2	1,3	1,2	5,6	5,6	9,6	0,7	44,4	0,8	3,0	86,6
22	0,0	2,9	0,2	3,7	4,0	3,1	11,2	23,7	8,5	0,4	4,0	12,9	74,6
TOTAL	6,2	4,9	106,2	5,0	5,2	8,7	16,8	33,5	9,2	44,8	4,8	15,9	261,2
%	2,4	1,9	40,7	1,9	2,0	3,3	6,4	12,8	3,5	17,2	1,8	6,1	100

Fuente: Cuentas Nacionales del Ecuador No. 18 - 1996.

Elaboración: La autora.

Ramas productivas: 05. Pesca y Caza, 06. Petróleo y Gas Natural, 07. Productos de la Refinación de Petróleo, 12. Productos Alimenticios Diversos, 15. Textiles, Prendas de Vestir y Productos de Cuero, 18. Industria Química y del Caucho, 19. Productos Minerales Básicos Metálicos y no Metálicos, 22. Electricidad, Gas y Agua, 24. Comercio, 25. Transporte, 31. Servicios a los Hogares, 32. Servicios Gubernamentales.

Los totales que se construyen en la primera línea de la última fila del Cuadro 10 son los valores absolutos de la participación de cada rama en el consumo de productos energéticos. Por

su parte, la segunda línea de la última fila presenta la participación porcentual de cada una de estas ramas en la demanda de productos energéticos. Se observa que los valores totales se encuentran en un rango muy amplio (el promedio de los valores de la última fila es de 21,77 con una desviación estándar de 29,47). Al calcular el porcentaje total de participación de cada sector, esta situación se ilustra con mayor claridad. Las ramas que fabrican *productos de la refinación de petróleo, transporte y electricidad, gas y agua* son las que poseen los principales encadenamientos con los productos del sector energético.

A partir de la estructura de consumo de los productos energéticos, es posible proceder a analizar algunos aspectos del ejercicio empírico. Empleando el criterio que se obtuvo del ejercicio anterior, las columnas del Cuadro 11 reproducen las ramas productivas que son las principales usuarias de productos energéticos. Esta vez se las ha clasificado en orden descendente, empezando por la que más emplea estos productos. En las filas del Cuadro 11, se presentan los productos energéticos; se han sombreado aquellas celdas de las ramas productivas en las cuales se observó una mejora permanente en la productividad (expresada a través de una trayectoria descendente de los coeficientes técnicos)⁶ en el período 1992-1995. Las celdas marcadas con una “x” son aquellas en donde, al no existir algún tipo de encadenamiento entre el insumo y la rama respectiva, tampoco actúa ningún coeficiente técnico.

Cuadro 11: Evaluación de la Productividad

Producto/ Rama	07	25	22	19	32	24	18	05	15	12	06	31
06		x		x	X	x	x	x	x	x		
07												
22								x				

Fuente: Cuentas Nacionales del Ecuador No. 18 - 1996.

Elaboración: La autora.

Ramas productivas: 05. Pesca y Caza, 06. Petróleo y Gas Natural, 07. Productos de la Refinación de Petróleo, 12. Productos Alimenticios Diversos, 15. Textiles, Prendas de Vestir y Productos de Cuero, 18. Industria Química y del Caucho, 19. Productos Minerales Básicos Metálicos y no Metálicos, 22. Electricidad, Gas y Agua, 24. Comercio, 25. Transporte, 31. Servicios a los Hogares, 32. Servicios Gubernamentales.

Como se aprecia en el Cuadro 11, de las 27 intersecciones en donde existe una relación insumo-producto y, por tanto, es posible calcular un coeficiente técnico, tan sólo en siete (en el 25,9%) se observa una mejora en la productividad de los procesos productivos entre los años 1992 y 1995. En el resto de sectores, no ha existido un incentivo que favorezca esta tendencia. Sin embargo, es alentador destacar que en la rama de *productos de la refinación de petróleo*, la más importante consumidora de productos energéticos, sí se observa una inclinación a mejorar la productividad⁷. De todas maneras, para la lectura del Cuadro 11, es importante el análisis sobre los tiempos de adaptación a cambios tecnológicos que se expodrá más adelante.

Ahora bien, es necesario hacer hincapié en el hecho de que los coeficientes técnicos expresan una razón tecnológica calculada a partir de los valores de los insumos y el producto final. Por tanto, traen implícitas las fallas de mercado, introducidas a través de precios que no internalizan los costos externos del consumo de productos energéticos. Desde el punto de vista del análisis termodinámico, las posibilidades de estudio se multiplican el

momento en que los procesos productivos se expresan no solamente en valores monetarios, sino también en unidades energéticas. Esta experiencia se ilustró en el capítulo 3 con el ejercicio de aplicación de la TGAE.

Aún cuando el supuesto de estructura homogénea de coeficientes técnicos en todas las empresas de una rama productiva establece una generalización que ignora las ventajas relativas de la estructura tecnológica de empresas individuales, desde el punto de vista de la macroeconomía, es necesario trabajar con este tipo de supuestos que permitan construir los grandes agregados de la economía. La identificación de la eficiencia termodinámica de una u otra alternativa tecnológica puede realizarse a través de ejercicios microeconómicos como los anteriores. Este tipo de ejercicios permiten determinar las líneas generales que es conveniente adoptar en la elaboración de una política de incentivos hacia el uso de los productos energéticos que minimizan el deterioro entrópico. Sin subvalorar el aporte del análisis macroeconómico puro, éste constituye un ejemplo de cómo los fundamentos microeconómicos muestran una enorme utilidad para elaborar políticas macro.

Desde el punto de vista del análisis termodinámico, la información que provee la MIP es importante aunque insuficiente para evaluar la eficiencia de la estructura productiva ecuatoriana. Sin embargo, los ejercicios desarrollados ilustran la necesidad de profundizar en el análisis termodinámico, sobre todo en los sectores productivos que más podrían beneficiarse directamente de un uso energético más eficiente. Este es el caso, por ejemplo, del sector petrolero, el transporte y el sector eléctrico, cuyos procesos productivos les convierten en los principales compradores de productos energéticos.

Indirectamente, las beneficiarias del uso más eficiente de los productos energéticos son todas las personas que son consu-

midoras finales de los productos de estas ramas y que, en muchos casos, absorben los costos externos socializados de estos procesos productivos, en forma de ruido, humo, calor y otros estados de energía disipada. Es importante recordar que, desde el punto de vista del análisis entrópico, los procesos menos eficientes resultarán en una mayor cantidad de efectos externos.

Para que la eficiencia termodinámica pueda lograrse a través de mecanismos de mercado, es importante que los precios de los productos energéticos hayan internalizado los costos externos de su consumo. Sólo de esa manera se establecerá una estructura de mercado en la cual no se subsidie la ineficiencia termodinámica. En el mediano y largo plazo, esto supondrá, para el país, un desaceleramiento de su proceso de deterioro entrópico, el cual se manifestará en mejores condiciones ambientales para la salud humana y en una reducción del ritmo de destrucción de los ecosistemas naturales y de pérdida de la biodiversidad.

iv. Comparación con los resultados del ejercicio microeconómico

Tras haber analizado la evolución de los coeficientes técnicos, vale la pena mencionar un aspecto adicional relacionado con ellos. En el capítulo anterior, al realizar el ejercicio de aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía, se construyeron dos coeficientes que fueron el centro del análisis desarrollado. Se trata de la rentabilidad monetaria y la eficiencia energética, ϵ y η . Estos coeficientes se definen como la razón entre la producción y el consumo intermedio expresada, en el primer caso, en unidades monetarias y, en el segundo, en unidades energéticas. Para el ejercicio de los autobuses, el único consumo intermedio que se contabilizó fue el combustible, es decir, un producto energético.

Puesto que los coeficientes técnicos de la MIP son equivalentes a la inversa de la rentabilidad monetaria expresada en la

variable, resulta interesante comparar los resultados del ejercicio individual de los sistemas de transporte para la ciudad de Quito con los coeficientes del agregado que se obtuvieron en la MIP.

En el Cuadro 12, se presentan los resultados del ejercicio del capítulo anterior y los coeficientes técnicos de la MIP para el año de 1995 en la primera y segunda columnas, respectivamente. En las filas, se describe si se trata de la relación entre la producción de transporte y el insumo eléctrico ($1/\varepsilon$ en el ejercicio del Trolebús y el respectivo coeficiente de la MIP en el ejercicio macro) o su relación con el insumo derivado de petróleo ($1/\varepsilon$ en el ejercicio de los autobuses a diesel y el respectivo coeficiente de la MIP en el ejercicio macro).

Cuadro 12: Comparación de Resultados

COEFICIENTE	Ejercicio Micro	Ejercicio Macro
$\frac{\text{Producción de Transporte}}{\text{Insumo Eléctrico}}$	0,007	0,033
$\frac{\text{Producción de Transporte}}{\text{Insumo derivado del Petróleo}}$	0,12	0,115

Elaboración: La autora.

Los resultados recogidos en el Cuadro 12 son interesantes por varias razones. En primer lugar, es necesario aclarar que los valores de los coeficientes técnicos de la MIP que se emplearon corresponden al año 1995. El sistema Trolebús entró en completo funcionamiento sólo a mediados de 1996. Antes de ese año, no existía en el país ningún otro servicio de transporte movido por energía eléctrica. El consumo intermedio de *electricidad, gas y agua* de la rama productora de servicios de transporte se refiere

al consumo elemental de estos servicios que realizan las compañías de transporte y no es una medida monetaria de la rentabilidad económica de vehículos movidos por este tipo de energía. Por esa razón, el coeficiente técnico del sector de transporte con respecto a su consumo intermedio de *electricidad, gas y agua* no es comparable con la inversa de la rentabilidad monetaria del ejercicio micro pues se refiere a dos realidades totalmente distintas. Sin embargo, como en 1996 entró en funcionamiento el sistema Trolebús, es de prever que, a partir de ese año, la MIP refleje un mayor consumo intermedio de electricidad por parte del sector transporte y, por tanto, se tenga una distancia mayor entre el coeficiente técnico y la inversa de la rentabilidad monetaria producto del ejercicio micro. El supuesto que se hace para prever estos resultados es que el valor agregado bruto de la rama productora de servicios de transporte no sufrirá un incremento porcentual mayor al del consumo intermedio de *electricidad, gas y agua*.

A diferencia del caso anterior, es interesante descubrir que los coeficientes técnicos de uso de combustibles derivados del petróleo en el transporte son prácticamente iguales para los ejercicios macro y microeconómico. En la serie que se recogió en el Anexo 2 es posible verificar que entre 1992 y 1995, este coeficiente técnico en la MIP se mantuvo en un intervalo entre 0,113 y 0,117. Esto permitiría validar los resultados de ambos ejercicios, tanto a escala individual, como de los agregados.

v. Incentivos para la eficiencia, cambio tecnológico y tiempo

Para el análisis de la evolución de los coeficientes técnicos realizado en las secciones precedentes, se utilizó una serie temporal que comprendía un período de cuatro años (1992-1995). Sin embargo, es difícil esperar cambios en la trayectoria de la productividad, reflejada en los coeficientes técnicos, en un período tan corto. Esta limitación fue planteada en un apartado ante-

rior. El propósito de los siguientes párrafos es ampliar la reflexión sobre los tiempos que toman los cambios tecnológicos que persiguen un uso más eficiente de la energía. Para ello se ha empleado un estudio elaborado por el Instituto Europeo de Política Ambiental sobre la elasticidad precio de los combustibles (Von Weizsäcker y Jesinghaus, 1992:27-56).

La escasez es el principal incentivo que mueve a las sociedades a la sustitución de la demanda de un bien por la de otro. En los mercados, la señal de escasez se refleja en los precios de los bienes. Para evaluar el grado de intensidad en la respuesta de la demanda de un producto ante variaciones en su propio precio o en el de sus bienes sustitutos y complementarios, la microeconomía emplea el concepto de elasticidad. Por su naturaleza, la elasticidad no es un parámetro constante. Ésta cambia permanentemente en el tiempo.

En este caso específico, ante cambios en los precios de los productos energéticos, la elasticidad de su demanda en el corto plazo no es igual a aquella que se calcula después de un largo período en el cual los precios mantuvieron una tendencia. Von Weizsäcker y Jesinghaus proponen que el sustento empírico de esta afirmación es la respuesta que observó la demanda europea de combustibles ante el incremento de su precio, iniciado con el choque de oferta de fines de los años setenta.

En ese momento, la señal de los precios en el mercado mundial de combustible fue evidente: todos pudieron darse cuenta y reaccionar ante ella. En ese proceso de reacción, los autores sugieren que es posible distinguir cinco etapas de ajuste a los nuevos precios del combustible, que, si bien años después tuvieron un descenso considerable, se espera que mantengan una tendencia al alza a medida que se agoten las reservas mundiales de petróleo.

Von Weizsäcker y Jesinghaus proponen que la primera etapa de reacción de los consumidores al cambio en los precios de la energía es inmediata. Aquella etapa consiste en un intento generalizado por disminuir el nivel de desperdicio o uso innecesario de energía que comúnmente se tiene. Ejemplos de la etapa son los esfuerzos por mantener apagadas las luces que no se emplean o por reducir los paseos en automóvil.

El segundo nivel de ajuste a la estructura de precios de la energía, propuesto por los autores, ocurre en forma gradual y concluye el momento en que todos los bienes que poseían los consumidores han sido reemplazados por otros más eficientes. En esta etapa, la eficiencia en el uso de energía se convierte en un criterio que guía las decisiones de compra de los consumidores y se refleja en la manera cómo los vendedores anuncian sus productos.

Para Von Weizsäcker y Jesinghaus, la tercera etapa de adaptación a los nuevos precios de la energía se refleja en la respuesta de los productores hacia los cambios en las preferencias de los consumidores. Es decir, los productores compiten por desarrollar productos nuevos que sean más eficientes. Por las características de esta etapa, se trata de un proceso gradual.

La cuarta fase en el proceso de ajuste de la sociedad a la elevación de los precios de la energía que proponen los autores consiste en la decisión del Estado y de los productores de bienes que consumen energía de realizar inversiones en la investigación y desarrollo de sistemas energéticos más eficientes o fuentes de energía renovables. Para obtener resultados efectivos, una etapa como esta toma tiempos más largos, de entre diez y cuarenta años.

Finalmente, el quinto y último nivel en que se observan los resultados de la adaptación de la sociedad a la nueva estruc-

tura de precios de la energía toma varias décadas en ocurrir. Von Weizsäcker y Jesinghaus describen que esta fase se caracteriza por una reducción en la demanda total de energía que se debe a cambios en la estructura de vivienda, en la infraestructura y, en general, en la forma de vida de las personas.

Los autores sugieren que existe la suficiente base empírica para proponer que los productos energéticos poseen una elasticidad-precio alta si su precio aumenta permanentemente y en forma considerable en un período de varios años. Este postulado confirma los resultados del ejercicio empírico realizado en el presente trabajo, en el cual se aprecia que cuatro años es un período demasiado corto como para observar cambios en la estructura tecnológica del Ecuador.

Sin embargo, ante aumentos persistentes de los precios de los productos energéticos, es de esperar respuestas por el lado la demanda en lapsos más largos. Como una política para racionalizar el consumo de productos energéticos, los autores de este estudio sugieren la aplicación de una reforma tributaria ecológica que consista en incrementos sostenidos de los precios de los combustibles. Sería de esperar que esta reforma tuviera grandes impactos en el comportamiento económico y que condujera a patrones de consumo y uso de los recursos más beneficiosos para el ambiente⁸.

vi. La estructura de consumo energético: un espejo de las economías

Una vez realizados los análisis anteriores, quedan varias preguntas pendientes. ¿Qué tan buenos son los coeficientes técnicos de la MIP? ¿Cómo se refleja en ellos la estructura productiva ecuatoriana? Desde la óptica de la teoría expuesta en este trabajo, las preguntas anteriores son de fundamental importancia pues proponen líneas de reflexión sobre la necesidad de emplear eficientemente uno de los más importante recursos con

que cuenta el Ecuador: su capital energético. Por esta razón, en un intento por encontrar luces que orienten las respuestas a estas preguntas, en la siguiente sección se comparan los coeficientes técnicos del uso de los productos energéticos en Ecuador con los de Alemania. Se escogió a Alemania para esta comparación pues este país es destacado con frecuencia por sus políticas de promoción del uso eficiente de la energía.

Una de las principales dificultades que surgió en la construcción de los datos empleados en esta comparación es el hecho de que la clasificación de las ramas productivas empleada en la MIP alemana no coincide con la que se emplea en Ecuador. A pesar de este problema, se trabajó con dos ramas de la MIP alemana: *electricidad, agua y minería* (02) y *productos químicos y derivados del petróleo* (03). Para efecto de las comparaciones, el primer sector se hizo equivalente a la rama *electricidad, gas y agua* (22) de la MIP ecuatoriana y el segundo, se equiparó con la rama de *productos de la refinación de petróleo* (07). Por la diferente dotación de recursos naturales de los dos países, Alemania no posee una rama similar a *petróleo y gas natural* (06), cuya participación es importante en la contabilidad nacional ecuatoriana. Los datos de la MIP alemana corresponden al año 1996.

El primer aspecto que se compara en el Cuadro 13 es la participación relativa de las ramas productivas en el consumo de productos energéticos. Las ramas se presentan en orden descendente, empezando por la mayor consumidora de estos productos. Este cuadro ilustra algunas diferencias básicas entre las estructuras productivas de uno y otro país.

Cuadro 13:
Participación de las Ramas Productivas en el Consumo de Energía

Insumo	Ecuador	Alemania
<i>Productos de la refinación del petróleo</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Transporte - Electricidad, gas y agua - Prod. de refinación de petróleo - Pesca y caza - Minerales básicos - Industria química y del caucho 	<ul style="list-style-type: none"> - Prod. químicos y derivados de petróleo - Construcción - Maquinaria de acero, vehículos y barcos - Servicios no transados en el mercado - Prod. electrónica y mecánica fina - Papel, textiles, cuero y vestido
<i>Electricidad, gas y agua</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Electricidad, gas y agua - Servicios gubernamentales - Minerales básicos - Comercio - Servicios a los hogares - Textiles, vestido y cuero 	<ul style="list-style-type: none"> - Electricidad, gas y minería - Prod. químicos y derivados de petróleo - Prod. de hierro, acero y no metálicos - Servicios transados en el mercado - Comercio - Servicios no transados en el mercado

Fuentes: 1) Cuentas Nacionales del Ecuador N°. 18 - 1996; 2) Statistisches Jahrbuch 1996 für die Bundesrepublik Deutschland

Elaboración: La autora

Para el caso de las ramas consumidoras de *productos de la refinación del petróleo*, son evidentes las diferencias entre las estructuras productivas de ambos países. En el caso de Alemania, una gran parte de los *productos de la refinación del petróleo*, los destina como insumo de su industria pesada o de alta tecnología (productos químicos, construcción, maquinaria y productos electrónicos). Por su parte, Ecuador emplea la mayor parte de los derivados de petróleo de los que dispone en la producción de servicios (transporte y electricidad) y en actividades primarias (caza, pesca y extracción de minerales básicos).

El objeto del segundo análisis que se presenta en este apartado es comparar los coeficientes técnicos ecuatorianos y los alemanes para las ramas que son las principales consumidoras de productos energéticos en Ecuador. Esta información se recoge en el Cuadro 14.

Para elaborar el Cuadro 14, fue necesario equiparar las clasificaciones de las ramas productivas de las MIP alemana y ecuatoriana. A pesar de la limitación que estas comparaciones traen implícita, es interesante observar sus resultados. Como se había expuesto en secciones anteriores, puesto que los coeficientes técnicos resultan de dividir el consumo intermedio de una rama productiva para su producción total, éstos representan el inverso de la productividad de cada rama. Por esta razón, una mayor eficiencia en el uso del insumo energético debería reflejarse en coeficientes menores.

La tabla de comparación de resultados muestra que, salvo una excepción - el consumo de *productos de la refinación de petróleo* de la rama que produce *electricidad, gas y agua* - en todos los casos los coeficientes técnicos son menores en Ecuador que en Alemania. ¿Cómo interpretar este resultado en términos de la eficiencia en el uso de la energía en uno y otro país?

Cuadro 14: Comparación de Coeficientes Técnicos

Insumo y Principales Consumidoras	Coefficiente Ecuador (en porcentaje)	Coefficiente Alemania (en porcentaje)
<i>Prod. de la Refinación de Petróleo</i>		
Transporte	11,50	–
Electricidad, gas y agua	15,39	4,14
Prod. de refinación de petróleo	16,81	47,09
Pesca y caza	5,86	18,06
Minerales básicos	2,61	4,14
Industria química y del caucho	2,56	47,09
<i>Electricidad, gas y agua</i>		
Electricidad, gas y agua	11,64	59,25
Servicios gubernamentales	1,18	2,84
Minerales básicos	2,43	59,25
Comercio	0,65	5,08
Servicios a los hogares	0,92	2,5
Textiles, vestidos y cuero	0,79	4,17

Fuentes: 1) Cuentas Nacionales del Ecuador No. 18 – 1996; 2) Statistisches Jahrbuch 1996 für die Bundesrepublik Deutschland.

Elaboración: La autora.

Para contestar esa pregunta, es necesario emplear varios argumentos. En primer lugar, un factor que debe tomarse en cuenta a lo largo de toda esta comparación entre los coeficientes técnicos ecuatorianos y alemanes son las diferencias que existen entre la clasificación de las actividades productivas en la MIP de uno y otro país. Cualquier resultado que se obtenga del análisis de los datos estará distorsionado, en alguna medida, por ese factor.

Un segundo elemento importante, que se debe tener en cuenta para entender las diferencias entre los coeficientes técni-

cos de la MIP de Alemania y la de Ecuador, es el hecho de que estos dos países tienen estructuras productivas totalmente diferentes. Mientras la economía ecuatoriana se sostiene sobre todo de las exportaciones de recursos naturales con poco valor agregado nacional, Alemania constituye uno de los países más ricos del mundo y cuenta con un aparato industrial desarrollado. En la economía ecuatoriana coexisten grandes mercados informales, métodos de producción artesanales y el uso de instrumentos y utensilios tradicionales. Por esta razón, no debería sorprender el descubrir que la economía alemana, como la de cualquier país industrializado, consume productos energéticos más intensamente que la ecuatoriana. Como se propuso en el capítulo 2 de este trabajo, el consumo exosomático de energía de un país está positivamente relacionado con su producto per cápita.

Finalmente, el tercer aspecto que debería considerarse al hacer una lectura de los coeficientes técnicos como medida de la eficiencia de un aparato productivo, es que la razón entre el consumo intermedio y el producto de una rama productiva es una relación monetaria y no física. En este sentido, la relación puede estar sujeta a múltiples distorsiones de los sistemas de precios, las mismas que suponen que el coeficiente técnico no necesariamente refleje una razón física entre insumo y producto, la cual es fundamental para evaluar la eficiencia de un sistema.

Los tres elementos anteriores ayudan a explicar los resultados de la comparación entre los coeficientes técnicos de la MIP ecuatoriana y de la alemana. El hecho de que los coeficientes de Alemania sean mayores a los ecuatorianos no quiere decir, necesariamente, que el aparato productivo nacional es más eficiente que el alemán. La información más importante que esta comparación revela es la diferencia entre la intensidad en el consumo energético del aparato productivo de un país cuya producción depende de su sector primario y la de otro país con un fuerte sector industrial.

En términos de eficiencia termodinámica, para establecer qué país produce un menor deterioro entrópico, sería necesario contar con información sobre los flujos insumo-producto medidos en unidades físicas. Sólo este tipo de datos permitiría llegar a conclusiones sobre la eficiencia de la estructura tecnológica de uno y otro país.

Finamente, en este punto, valdría la pena preguntarse si, para que el Ecuador alcance un nivel de desarrollo similar al alemán, es necesario que el país sustituya su estructura productiva y –después de hacer una inversión gigantesca– cuente con un aparato industrial intensivo en el consumo de energía. Considerar que el país debe dar un “salto” de este tipo para desarrollarse tiene poco sentido desde el punto de vista de la sustentabilidad del desarrollo. Como se expuso en los capítulos 2 y 3, la capacidad de carga de la tierra es limitada y, por tanto, no es físicamente posible para el planeta sostener niveles de consumo y producción similares a los de los países más ricos en todas las regiones del mundo. En segundo lugar, no tiene sentido pensar en el desarrollo con una visión rostowiana que lo presenta como un proceso lineal. Uno de los puntos de convergencia de la literatura escrita sobre el desarrollo sostenible es su concepción del desarrollo como un proceso cualitativo, de mejora efectiva de la calidad de vida. Alguien comparaba a este proceso con la creación musical y decía que las mejores canciones no siempre son aquellas que tienen una mayor cantidad de notas, sino las que han distribuido el sonido de esas notas de la manera más armoniosa.

B. Reflexiones teóricas

La última parte de este capítulo plantea algunas observaciones a los supuestos teóricos que sustentan la elaboración de la MIP. Estos cuestionamientos parten de las insuficiencias que, a la luz del análisis termodinámico, presenta la MIP en el estudio de los procesos económicos. En un primer apartado se analizan los

efectos de ignorar en la MIP a todas las producciones residuales de los sectores económicos que no se transan en el mercado. En la segunda parte de esta sección se reflexiona sobre las repercusiones del tratamiento que ha otorgado la Contabilidad Nacional convencional al capital natural y sobre cómo se han desconocido los efectos de su depreciación. Es importante destacar la vigencia de este tipo de reflexiones, si se considera que los instrumentos de agregación económica (como la Matriz Insumo-Producto) proporcionan las guías fundamentales para la planificación del desarrollo de los países.

i. Producción que no se transa en el mercado

La metodología de elaboración de la Matriz Insumo-Producto prevé la posibilidad de que del proceso productivo de una rama económica, resulten otros bienes adicionales a la producción típica de esa rama. Estos bienes se conocen con el nombre de “producción secundaria” o “no típica” y también se incluyen en la MIP. En esta clasificación entran solamente aquellos bienes que, una vez producidos, se transan en un mercado distinto a aquel en donde la rama económica comercia su producción típica.

En este punto, el análisis termodinámico de los procesos productivos introduce un elemento de reflexión importante. La primera ley de la Termodinámica sostiene que la materia y la energía no se crean ni se destruyen, tan sólo cambian de estado y de lugar. La segunda ley de la Termodinámica afirma que el grado de desorden de un sistema aislado (su entropía) siempre aumenta. Desde el punto de vista del análisis económico, en el cual el objetivo es maximizar el bienestar de los individuos, la eficiencia termodinámica se alcanza cuando se desacelera el deterioro entrópico normal de un proceso productivo.

La MIP es un instrumento que proporciona los criterios fundamentales para analizar la interdependencia y la productividad de los diferentes sectores económicos. Por esta razón, también debería incorporar todos los flujos de producción que se generan en los procesos de transformación material. Específicamente, para el caso de los residuos de la producción, a pesar de que éstos no se transan en ningún mercado ni son un objetivo explícito de los procesos productivos, su acumulación sí afecta al bienestar de la sociedad. Por esta razón, los flujos de desechos no pueden quedar al margen de este instrumento fundamental de programación económica.

Tradicionalmente se han socializado los costos de los efectos de la emisión de residuos sobre la calidad de vida de las personas y los ecosistemas cercanos a ellas. Es decir, ningún agente privado se ha hecho cargo de esos costos. Sin embargo, los beneficios de los procesos productivos sí han sido absorbidos por agentes privados. Este factor ha incentivado la introducción al mercado de un mayor número de productores, los mismos que han incrementado la magnitud de la externalidad. Se trata de un típico caso de “tragedia de los bienes comunes”, en donde la calidad ambiental es un bien que no pertenece a nadie y del cual todos aprovechan para su beneficio individual.

Ahora bien, el objetivo de este apartado no es estudiar las distorsiones que la socialización de las externalidades causa en las decisiones de los agentes. Lo que sí se trata de ilustrar es la limitación que presenta la MIP al no incluir en su estructura a otros productos que también resultan de los procesos productivos. Esta reflexión gana peso en la medida en que estos productos, tradicionalmente considerados como “residuos”, afectan la calidad ambiental de una región y, por tanto, disminuyen el nivel de utilidad o bienestar de sus habitantes.

Si la MIP no ilustra esta realidad, no permite generar políticas que incentiven las producciones de mayor eficiencia termodinámica. Por el contrario, se cuenta con un instrumento incompleto, que no refleja un concepto integral de productividad y que dificulta el identificar caminos que permitan elevar el nivel de bienestar general.

La metodología de Naciones Unidas para Contabilidad Ambiental y Economía Integrada (1994: 151-152) propone examinar cuatro tipos de análisis para insertar en la lógica de insumo-producto los aspectos ambientales. Estas propuestas se describen en los siguientes párrafos. Es muy importante reconocer que, para mejorar a través de cualquiera de estas maneras a la MIP, no sólo es necesario perfeccionar las propuestas metodológicas sino también disponer de los datos que ellas demandan.

La primera alternativa consiste en insertar las ramas productoras de servicios de protección ambiental dentro de la estructura de la MIP. De esta forma, se incorporarían las corrientes monetarias que se destinan a corregir los daños ambientales causados por los procesos productivos. Indirectamente, estas corrientes representarían los costos de no alterar la calidad ambiental que deberían ser asumidos por los agentes privados que absorben los beneficios de los procesos productivos. Este tipo de metodología funcionaría en una sociedad en la que exista una legislación efectiva y una capacidad de control que haga cumplir el principio de “el que contamina, paga”. Sin embargo, una limitación de este método es que los gastos para mitigar el daño ambiental se consideran contribuciones al producto interno bruto.

La segunda opción propuesta por Naciones Unidas consiste en analizar los flujos físicos de materias primas, bienes producidos y residuos para “estudiar las repercusiones ... con respecto a la disminución de activos naturales, la producción de bienes y el destino de los residuos” (Naciones Unidas, 1994: 151). De es-

ta manera, sería posible elaborar balances de materiales y energía. Estos flujos físicos podrían relacionarse con datos monetarios sin necesidad de incorporar los costos ambientales imputados. Este tipo de información sería muy valiosa para el análisis termodinámico pues permitiría construir identidades macroeconómicas parecidas a las que propone la TGAE, pero a escala macroeconómica.

La tercera sugerencia de Naciones Unidas consiste en determinar en el análisis insumo-producto los costos ambientales imputados en el mantenimiento de la calidad ambiental. Este tipo de análisis podría emplearse para comparar los diferentes estándares ambientales que existen en el ámbito internacional. El problema principal que presenta este método es que no pone en evidencia el nivel de presión sobre los recursos naturales y, por tanto, su riesgo de sobre explotación (Da Ros y Marconi, 1997: 50).

Finalmente, una última posibilidad que propone Naciones Unidas sugiere emplear modelos de simulación para estudiar la repercusión en los activos naturales de cambios en la estructura de insumos y de utilidades finales. Este tipo de modelos permitiría analizar las consecuencias y las transformaciones que se producen en el corto y mediano plazo cuando cambia la estructura de la utilización de materias primas, de la fabricación del producto y de la generación de residuos.

Para concluir esta reflexión, es importante reconocer que ya existen propuestas metodológicas para complementar el análisis económico convencional con elementos de la realidad física. En adelante, será necesario afinar esta metodología y hacerla operativa a través de la incorporación de información sobre flujos materiales en los procesos económicos. La perspectiva de perfeccionar los instrumentos económicos e incentivar, a través de ellos, la desaceleración del deterioro entrópico, abre nuevas ex-

pectativas sobre la posibilidad de que los seres humanos encuentren formas más armónicas de relación con su entorno.

ii. Productividad del capital natural

Una segunda limitación que, desde el punto de vista del análisis termodinámico, presenta la MIP tiene que ver con el tratamiento que otorga a la “producción” de recursos naturales. Como se analizó en el marco teórico de este trabajo, la actividad humana acelera los procesos naturales de deterioro entrópico. La especie humana se ha adaptado para sobrevivir en casi todas las regiones del planeta, por medio del aprovechamiento de gradientes energéticos de diferente tipo.

Desde una óptica antropocéntrica, los recursos naturales se clasifican, según el tiempo que tardan en regenerarse, en recursos renovables y no renovables. Varios autores han desarrollado modelos económicos para identificar las sendas óptimas de explotación de unos y otros recursos⁹. El objetivo de este tipo de modelos es maximizar el beneficio intertemporal del aprovechamiento de los recursos naturales. Con todas sus limitaciones, estos modelos proponen guías para el manejo de los recursos naturales. En estos trabajos teóricos, una de las pautas fundamentales para identificar la trayectoria óptima de extracción o cosecha de un recurso es la productividad del mismo.

En el caso de los recursos renovables, la productividad no es constante pues está dada por una diversidad de factores como la tasa natural de crecimiento del recurso, el tamaño de la población, la calidad ambiental, o la inversión en mejoras ambientales. Para el caso de los recursos no renovables, no es posible hablar de productividad pues su regeneración es muy lenta. Sin embargo, la senda de explotación óptima está determinada tanto por los costos de extracción (los cuales aumentan a medida que se reduce el stock de un recurso y es más difícil acceder a él),

como por la existencia de tecnología que permita sustituir esos recursos a un costo razonable.

Tal como se elabora actualmente la MIP, este instrumento no proporciona los elementos necesarios para planificar sendas óptimas de aprovechamiento de los recursos naturales. La única medida de productividad que es posible extraer de la MIP se fundamenta en los coeficientes técnicos. Estos coeficientes son sólo una razón entre costo de los insumos y precio del producto. Por tanto, ignoran completamente los flujos físicos de los procesos productivos, la productividad del capital natural y los efectos de la sobreexplotación del capital natural en las existencias de recursos.

Este tipo de limitaciones de la MIP se traduce, más adelante, en agregados macroeconómicos que ocultan elementos importantes para la toma de decisiones de política económica. Por esta razón, países como el Ecuador, cuya economía depende en gran medida de sectores relacionados a la explotación de recursos naturales, no pueden dejar de lado tales preocupaciones.

El análisis termodinámico ilustra cómo la sustentabilidad del desarrollo económico no puede evaluarse sin contar con información sobre los procesos físicos relacionados con la producción. En este sentido, una de las propuestas que se hizo anteriormente vuelve a adquirir vigencia: la necesidad de recoger información sobre los flujos físicos de materias primas, bienes producidos y residuos y relacionarlos con los datos monetarios. En la práctica, la única manera de incorporar el análisis termodinámico al estudio del desarrollo económico, será proporcionando a los economistas la información que les permita tomar decisiones que orienten a los procesos productivos hacia una auténtica senda de eficiencia.

NOTAS

- 1 Los números entre paréntesis corresponden a la denominación que estas ramas productivas reciben en las Cuentas Nacionales.
- 2 En este sentido, el Ecuador responde al patrón mundial según el cual el 64,1% de la capacidad instalada corresponde a energía termoeléctrica, pero solamente el 29,7% de la electricidad generada proviene de esas fuentes (OLADE, 1996). En un momento dado, los países construyeron grandes centrales termoeléctricas. Sin embargo, los cambios en el precio internacional del petróleo y las ventajas relativas de la hidroelectricidad, cuyo insumo era un recurso renovable que no se agotaba en la generación de electricidad y no producía emisiones peligrosas, incentivaron la construcción y el uso intensivo de este tipo de infraestructura. En el país, los principales problemas ambientales derivados de la generación hidroeléctrica se relacionan con el inadecuado manejo de las cuencas de los ríos, agravado por la deforestación.
- 3 Por definición, el coeficiente técnico es la inversa de la productividad.
- 4 Como se explica más adelante, la interrelación entre la rama generadora de electricidad y la proveedora de productos de la refinación del petróleo tiene un importante factor estacional que, periódicamente, se hace presente cuando las condiciones climáticas obligan a suspender la provisión de energía hidroeléctrica y demandan un uso intensivo de las centrales térmicas. Seguramente, este factor se refleja en los datos de 1995, año en que comenzó una de las mayores crisis energéticas que ha sufrido el país, que debió soportar más de seis meses de racionamientos energéticos.
- 5 Es importante aclarar que el objetivo del alza de precios de los combustibles no ha sido desincentivar su consumo sino corregir el desequilibrio fiscal generado por el subsidio que se otorgó desde la década de los setenta al consumo de estos productos.
- 6 El criterio empleado para definir “una mejora permanente en la productividad” es verificar si los coeficientes técnicos observaron durante los cuatro años una trayectoria descendente. Como en muchos casos se producen incrementos insignificantes, se sombrearon las celdas de aquellos sectores en los cuales al menos dos de los tres valores siguientes al de 1992 fueron menores que éste y en donde el valor del coeficiente en 1995 necesariamente fue menor a aquél en 1992.
- 7 Sin embargo, la rama de *productos de la refinación de petróleo* es la única que tiene un coeficiente técnico mayor al 100%, lo que supone que gasta en insumos una suma mayor al valor de mercado de su producto.

- 8 En el estudio mencionado, los autores realizan un ejercicio empírico para ilustrar los cambios en la eficiencia en el uso de la energía y los cambios en sus precios en varios países desarrollados. Uno de los modelos presentados concluye que si los Estados Unidos hubiese mantenido una política de precios de combustible similar a la de Canadá, su nivel actual de consumo de ese producto sería inferior en un 25%.
- 9 Autores como Harold Hotelling, Krutilla y Fisher han desarrollado modelos para determinar la senda de explotación óptima de recursos naturales.

5. CONCLUSIONES

“Habida cuenta que los organismos, en general, y los hombres muy particularmente, necesitan degradar energía y materiales para mantenerse en vida, el único modo de evitar que ello redunde en un deterioro entrópico de la Tierra pasa por articular esa degradación sobre el único flujo de energía renovable que se recibe, el procedente del sol... Tres hechos hacen especialmente interesante y ejemplar, desde el ángulo de la gestión de recursos, la transformación de materiales y energía que se opera en el caso de la fotosíntesis. Uno es que la energía... procede de una fuente que a escala humana puede considerarse inagotable... A la vez que tal utilización no supone un aumento adicional de la entropía en la Tierra, sino la desviación hacia los circuitos de la vida de una energía que de todas maneras iba a degradarse. Otro, no menos importante, es que los convertidores que permiten la transformación de la energía solar en energía de enlace -las plantas verdes- se reproducen utilizando para ello esa misma fuente renovable... El tercero es que los desechos vegetales, tras un proceso de descomposición natural, se convierten en recursos fuente de fertilidad... La cuestión estriba en que la economía de los hombres sepa aprovecharse de la energía solar y sus derivados renovables para cerrar los ciclos de materiales, posibilitando que los residuos se conviertan otra vez en recursos...”

(Naredo, 1992, en Quiroga, R. y Van Hauwermeiren, S., 1996: 13).

Los ejercicios desarrollados en los capítulos anteriores, pero sobre todo su interpretación y análisis, ilustran la importancia de la utilización de instrumentos termodinámicos en el estudio de los procesos económicos de transformación material. La aplicación de las leyes de la Termodinámica al análisis económico permite enriquecer la comprensión cualitativa de los procesos productivos y, además, ofrece una serie de alternativas para mejorar la eficiencia, la rentabilidad y el bienestar que éstos proporcionan.

Un desarrollo sostenible y continuo, en el que las generaciones actuales no sacrifiquen las oportunidades de las generaciones del futuro de satisfacer sus necesidades, exige incorporar una lectura cualitativa de los procesos de crecimiento, que tome en cuenta la intensidad actual de la apropiación humana del espacio ambiental. Por esta razón, se impone la necesidad de enriquecer los parámetros con los que se evalúan y se comprenden las principales actividades económicas. Las leyes de la Termodinámica ofrecen un amplio y poco explotado abanico de opciones que contribuyen a lograr este objetivo. En las secciones precedentes se ha intentado ilustrar esta propuesta con aplicaciones prácticas de la teoría.

El principal reto planteado a lo largo de la investigación no fue la demostración de una hipótesis. Por el contrario, se trató de un desafío metodológico que consistió en mantener una línea teórica homogénea y consistente, tanto en el análisis macroeconómico, como en las aplicaciones microeconómicas. Cada uno de los ejercicios desarrollados permitió identificar conclusiones interesantes y poco comunes en ejercicios económicos tradicionales. En este sentido, el trabajo cumplió su objetivo de ilustrar cómo el análisis termodinámico enriquece al análisis económico con elementos cualitativos novedosos.

El propósito de este último capítulo es recoger los elementos más importantes que se inducen de los ejercicios empíricos de las secciones anteriores. Junto con ellos, se trabajarán algunas interpretaciones teóricas de conceptos económicos abordados desde la racionalidad de la termodinámica. Finalmente, se pondrán varias extensiones para la investigación.

A. Alcance del trabajo empírico

En el presente apartado, se presenta un resumen de las principales conclusiones a las que se llegó en cada uno de los ejercicios desarrollados en los capítulos 3 y 4. El objetivo de esta sección es sintetizar las conclusiones de los ejercicios e integrarlas con la teoría propuesta.

El ejercicio microeconómico permitió comparar diferentes aspectos relacionados con el consumo energético de dos alternativas de transporte: los autobuses de motor eléctrico y los de motor a diesel. De los resultados del ejercicio, es posible inducir algunas ideas:

1. La reducción del consumo de insumos en un proceso productivo permite alcanzar dos objetivos fundamentales: el aumento de la eficiencia energética y de la rentabilidad económica.
2. La rentabilidad de una actividad productiva no depende solamente del costo de los insumos y del precio de los productos, sino también de la eficiencia del proceso de transformación. Esta situación se ilustró en la aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía cuando, a pesar de que el precio de la energía eléctrica era 3,3 veces mayor al del diesel, el sistema de autobuses eléctricos resultó más rentable que el de autobuses a diesel porque los motores eléctricos son seis veces más eficientes.
3. Desde el punto de vista social, la eficiencia en el consumo energético es positiva porque ayuda a incrementar las ganancias de las unidades privadas. Pero también, las ventajas de una mayor eficiencia energética se reflejan en la reducción de las emisiones de gases, del ruido, de las vibraciones y de la generación de residuos sólidos. Todos estos son factores críticos para el bienestar humano y el equilibrio del ecosistema global.

4. Otra forma de comparar los efectos de un incremento de la eficiencia energética de dos procesos productivos es a través de la cuantificación de la intensidad del consumo material. Este criterio de análisis también recomienda los motores eléctricos puesto que la generación de hidroelectricidad es menos intensiva, desde el punto de vista material, que la producción de combustibles fósiles.
5. A pesar de que la capacidad de una sociedad de aprovechar los recursos de su entorno sí está limitada por su tecnología, el consumo energético humano depende también de otro tipo de factores sociales y culturales. Por esta razón, para reducir el consumo de energía de un sistema de transporte no sólo es necesario contar con las tecnologías más eficientes y aprovechar fuentes de energía renovables. También se puede lograr este objetivo a través de políticas como las siguientes: controlar el crecimiento de la población para disminuir la presión sobre los recursos naturales y sobre la dotación de servicios públicos; racionalizar el uso del suelo para minimizar la necesidad de la gente de transportarse grandes distancias varias veces al día; ofrecer incentivos que favorezcan el uso de medios de transporte con consumos energéticos menos intensos.

Por su parte, el ejercicio macroeconómico se sustentó en el análisis de la estructura de consumo energético del Ecuador y en la identificación de los principales flujos de insumos y productos entre los sectores productivos. Como el trabajo se realizó a partir de la Matriz Insumo-Producto, esta aplicación también permitió identificar algunas limitaciones que presenta este instrumento desde el punto de vista de la sustentabilidad. A continuación, se recogen varias conclusiones derivadas del ejercicio:

1. Con relación al análisis presentado en el ejercicio microeconómico, es interesante comprobar que -excluyendo a las propias ramas que fabrican productos energéticos- el

principal consumidor de energía en el país es el sector de transporte. Este hecho corrobora los argumentos esbozados en el capítulo 3 sobre la necesidad de formular política energética a través de los sistemas de transporte y los incentivos en ellos aplicados.

2. Del análisis de la evolución de los coeficientes técnicos, se verifica que, durante los cuatro últimos años, el aparato productivo nacional no ha experimentado mayores presiones para mejorar su productividad relativa al uso de energía. A pesar de la permanente elevación de los precios de los combustibles y de la electricidad, éstos no han constituido un incentivo suficiente para utilizar, con mayor eficiencia, estos productos.
3. Estudios empíricos sugieren que los productos energéticos poseen una elasticidad-precio alta si su precio aumenta permanentemente y en forma considerable en un período de varios años. Este postulado confirma los resultados del ejercicio macroeconómico, en el cual se aprecia que cuatro años es un lapso demasiado corto como para apreciar cambios en la estructura tecnológica del Ecuador. Sin embargo, ante aumentos persistentes de los precios de los productos energéticos, es de esperar respuestas por el lado la demanda en períodos largos. Como una política para racionalizar el consumo de productos energéticos, se sugiere la aplicación de una reforma tributaria ecológica que incremente los precios de los combustibles en forma sostenida.
4. En el trabajo con los coeficientes técnicos, es importante hacer hincapié en el hecho de que estos coeficientes técnicos se calcularon a partir de los valores de los insumos y del producto final. Por tanto, arrastran consigo las fallas de mercado introducidas a través de precios que no internalizan los costos externos de la producción y el consumo de energía. Desde el punto de vista del análisis termodinámico, la información monetaria es insuficiente. Contar

con información física permite enriquecer la comprensión de los procesos de transformación materiales y amplía las posibilidades de estudio.

5. Una estructura de precios que no internaliza tanto los costos externos de la producción, como el consumo de energía subsidia la ineficiencia energética de la producción. El tamaño de la economía mundial, en la actualidad, ya no permite darse el “lujo” de mantener este tipo de subsidios. En el mediano y largo plazo, éstos suponen un aceleramiento del proceso de deterioro entrópico, el cual se manifiesta en condiciones ambientales nocivas para la salud humana y en un aumento del ritmo de destrucción de los ecosistemas naturales y de pérdida de la biodiversidad.
6. La comparación de la estructura energética de Alemania y Ecuador ilustra las diferencias entre las estructuras productivas de estos dos países. La economía ecuatoriana se sustenta en la producción de bienes primarios y se caracteriza por la existencia de mercados informales y la subsistencia de métodos de producción artesanales. Por su parte, Alemania es un país con un fuerte sector industrial, en el cual el consumo exosomático de energía alcanza niveles más intensos.
7. El trabajo realizado con la Matriz Insumo-Producto permite identificar dos limitaciones de este instrumento en su forma de reproducir los procesos productivos. Primero, se debería incorporar a aquellos productos que, aunque no se transan en el mercado, son indispensables para describir la eficiencia termodinámica de los procesos productivos, como es el caso de los residuos. Segundo, la Matriz Insumo-Producto no proporciona los elementos necesarios para planificar sendas óptimas de aprovechamiento de los recursos naturales porque ignora la productividad del capital natural, que constituye un elemento crítico para la asignación intertemporal de recursos.

Las conclusiones de las aplicaciones empíricas ilustran el tipo de análisis que, en la práctica, puede producirse al incorporar el análisis termodinámico a la economía. La principal contribución de la Termodinámica se fundamenta en la convicción de que los precios no son los mejores instrumentos para describir los procesos productivos. Y puesto que la economía trabaja permanentemente en decisiones de asignación, esta ciencia necesita nutrirse de información exacta sobre los límites y capacidades del entorno de satisfacer las necesidades humanas.

La información que se ha generado en esta investigación, a partir de las aplicaciones empíricas, ilustra una de las cualidades más importantes de los indicadores necesarios para el desarrollo sostenible: su utilidad en la toma de decisiones de política. En este sentido, es sumamente importante destacar las posibilidades que ofrece el análisis presentado. Siguiendo el argumento expuesto en el párrafo anterior, en última instancia, el análisis termodinámico, al enriquecer la comprensión humana de los procesos de transformación material y perfeccionar la capacidad de tomar decisiones de asignación, abre nuevas alternativas en la formulación de políticas públicas y privadas.

Los elementos más importantes que aporta la Termodinámica para enriquecer el análisis económico permiten incorporar nuevas implicaciones en las definiciones convencionales y esto se ha demostrado en los capítulos anteriores. En el apartado siguiente se trabajan varias propuestas en este sentido. Al ampliar el espectro de interés de algunos temas de la economía, surgen nuevas necesidades en términos de información no monetaria que permita entender el funcionamiento de los sistemas naturales. Este acápite explica la importancia de contar con la información para construir indicadores de sustentabilidad. En la misma línea, el corolario ilustra cómo los instrumentos, propuestos en los ejercicios planteados en los capítulos anteriores, contribuyen

con elementos empíricos que permiten tomar mejores decisiones sobre la administración de los recursos escasos del planeta.

B. Nuevas interpretaciones de los mismos términos

El objetivo de este apartado es identificar, en los ejercicios desarrollados en los capítulos anteriores, algunos elementos con los cuales el análisis termodinámico aporta para enriquecer los conceptos de la economía.

Un primer aspecto – de fundamental interés para los economistas- que ha sido abordado a lo largo de esta investigación es el tema de la *eficiencia en la asignación de recursos escasos*. Como se observó en el ejercicio de aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía al caso del sistema de transporte del Distrito Metropolitano de Quito, la eficiencia termodinámica es un factor de suma importancia para tomar decisiones adecuadas de asignación intertemporal. Si la ley de la entropía determina que todo lo que existe está sujeto a un proceso permanente de deterioro y si las actividades humanas aceleran ese proceso, es tarea del economista, como administrador de recursos escasos, el establecer aquellas decisiones que se deben adoptar para minimizar el deterioro entrópico del planeta.

A pesar de que esa explicación parece algo abstracta, en la práctica, no limitar la acción humana sobre el deterioro entrópico del planeta supone reducir la calidad de la vida sobre la Tierra. La contaminación, la acumulación de residuos, la destrucción de la diversidad biológica, el deterioro de la calidad de los suelos no son sino las consecuencias de una presión excesiva sobre la capacidad material del planeta.

Tradicionalmente, la economía se ha preocupado por proponer mecanismos para lograr asignaciones eficientes. “Una asignación es eficiente en el sentido de Pareto cuando no es po-

sible mejorar el bienestar de todos los agentes... cuando cada uno de los agentes disfruta del mayor bienestar posible, dadas las utilidades de los demás” (Varian, 1992: 265). Esta condición se cumple el momento en que se igualan entre sí las utilidades marginales de cada uno de los agentes y, a su vez, éstas son iguales al precio del bien.

Como propone la microeconomía, la utilidad - o satisfacción que proporciona a una persona el consumo de un bien - es función de la cantidad consumida de dicho bien. Sin embargo, este trabajo ha puesto de relieve la necesidad de entender el bienestar como un proceso cualitativo, en el que “más” no es siempre sinónimo de “mejor”. Una forma de evitar que los modelos microeconómicos ignoren esta realidad es incorporar a la función de utilidad otros indicadores físicos que describan el bienestar de los individuos. John Pezzey (1992: 5-6) propone un ejercicio teórico interesante en el cual plantea una función de utilidad que depende no solamente del consumo, sino también de la calidad ambiental, expresada en dos variables que, a su vez, se relacionan con los niveles de consumo: el stock agregado de recursos naturales y el de contaminación acumulada.

Ese modelo supone incorporar indicadores físicos al análisis económico que, tradicionalmente, se sustenta sólo en variables monetarias. Una vez más, se ilustra la necesidad de ampliar el objeto de estudio de la economía más allá de la crematística. La presión humana sobre los recursos escasos del planeta obliga a los economistas a volver hacia el *oikos*, hacia el hogar. Conocerlo y entender los procesos naturales de reproducción y asimilación son tareas fundamentales del estudioso de la administración de los recursos de la Tierra.

Un segundo elemento que no puede aislarse del tema de la eficiencia en la asignación de recursos son los *precios*. Como se desprende del trabajo realizado, éstos constituyen el principal

criterio que guía las decisiones de los agentes económicos. Por tanto, la economía neoclásica busca permanentemente eliminar las distorsiones en los precios para que éstos lleven a los agentes a adoptar las decisiones adecuadas. ¿Cuáles son las decisiones “correctas” y cuáles las “incorrectas”? Es evidente que una ciencia en la que uno de los objetos de estudio más importantes es la escasez intente responder esta pregunta volviendo al tema de la asignación eficiente. Las decisiones socialmente correctas de los agentes económicos son aquellas que maximizan la eficiencia en la asignación intertemporal de recursos. Por lo tanto, si la economía busca como uno de sus objetivos principales el conducir a los agentes a adoptar decisiones de asignación correctas a través de los precios, éstos deben constituir señales adecuadas de la escasez de un producto.

Tanto la aplicación microeconómica como el ejercicio macroeconómico desarrollados en los capítulos anteriores, permitieron apreciar que en el Ecuador, los precios de la energía eléctrica y del combustible fósil no proporcionan señales adecuadas a los agentes que consumen estos bienes. En lugar de incentivar a los ecuatorianos a emplear la hidroelectricidad, un recurso renovable con escasa producción de residuos, los precios de mercado de la energía favorecen el consumo de recursos no renovables (los combustibles), que generan un serio problema de externalidades (contaminación), cuyos costos se socializan.

La comparación de los dos sistemas de transporte ilustró las diferencias en los precios de la energía eléctrica y el diesel. El análisis de estos datos parecería identificar una política de subsidio a la ineficiencia energética. Esta información se complementó con la evolución de los coeficientes técnicos de la Matriz Insumo-Producto. En ella no se pudo apreciar ninguna tendencia que refleje un incremento de la productividad de los sectores que producen energía, ni en la eficiencia de los consumidores de este bien.

Un tercer problema de estudio tradicional de la ciencia económica, la *equidad*, adquiere dimensiones interesantes con la incorporación de criterios e indicadores físicos en el estudio de los procesos productivos. Si se admite que el bienestar de las personas depende no sólo del nivel de consumo al que se accede sino también de la calidad ambiental del entorno en que se vive, entran al análisis dos conceptos fundamentales: los ritmos naturales de producción y asimilación. Al hablar de ritmos, se incorpora de inmediato el tema temporal. Como se propuso en el marco teórico de este trabajo, la ley de la entropía sugiere un deterioro progresivo de la calidad de la materia y la energía que no se asocia estrictamente al tiempo entendido como un fenómeno mecánico. Este deterioro natural e inevitable se acelera con la intervención humana.

En una concepción estática, la idea de equidad supone una cierta igualdad de oportunidades para que todas las personas accedan a condiciones básicas que les permitan subsistir y progresar. Es decir, toda persona debería tener derecho a utilizar una cantidad igual de espacio ambiental para su supervivencia. Desde una óptica dinámica, la equidad exige que las generaciones del presente cuenten con oportunidades materiales para satisfacer sus necesidades similares a las que tuvieron sus antepasados.

La aplicación de la huella ecológica en la comparación de las dos alternativas de transporte permitió ilustrar varias implicaciones de la equidad. Este tipo de elementos se refleja, por ejemplo, en el análisis de la distribución del consumo de energía para transporte. Lo interesante del análisis de la equidad no es la desigualdad en sí misma. El tema crítico se relaciona con los efectos que los excesos en el consumo de unos seres humanos tienen sobre el entorno y la calidad de vida de otras personas.

El *desarrollo* se conjuga con el tema de la equidad, como un cuarto elemento que se presta para esta lectura de la economía desde la Termodinámica. Estos dos elementos, fundamentales en el estudio de la ciencia económica, requieren enriquecer su análisis cualitativo a través de instrumentos e indicadores que describan el entorno físico que rodea a la vida humana. Esta necesidad es todavía más evidente si se aborda el tema del desarrollo sostenible, en el cual la variable temporal juega un papel fundamental.

Es importante destacar que, a pesar de que el término *desarrollo sostenible* se ha difundido en la última década, la noción de sustentabilidad no debería constituir una novedad en la ciencia económica. Economistas como Hicks, a principios de siglo, incorporaron esta noción a la definición de ingreso. Hicks definió el ingreso como la máxima cantidad de recursos que se puede consumir sin comprometer las posibilidades de consumo en el futuro, lo cual supone mantener un stock de capital constante. Los avances teóricos en materia de desarrollo y economía de los recursos naturales han permitido perfeccionar esta definición así como profundizar el estudio de las implicaciones de la sustentabilidad e integrar esta materia en propuestas más complejas (Claude, 1996: 5).

Finalmente, un quinto y último tema económico cuya comprensión se enriquece con el análisis de la Termodinámica es el *comercio internacional*. La asignación eficiente de recursos supone identificar las diferencias en la productividad de las regiones del mundo. Se parte de la convicción de que la capacidad de carga del planeta es mayor a la suma de las capacidades de carga de cada país porque el intercambio permite lograr rendimientos crecientes a escala.

Desde el nacimiento de la ciencia económica, se sugirió a las naciones especializarse en la producción de aquellos bienes

en los que tuvieran ventajas comparativas, es decir, aquellos que pudiesen producir a un menor precio relativo que otros países. La creciente complejidad de los procesos productivos determinó que esas ventajas estuviesen en función no sólo de la productividad natural y de la dotación de recursos de cada región, sino también de la organización social y la capacidad empresarial de sus habitantes o de la tecnología incorporada en la producción.

Hoy en día son estos últimos criterios los que determinan los términos de intercambio en el comercio internacional. El valor agregado a los productos que se comercian en el mercado externo es el que define su precio. Sin embargo, como se observó en la aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía, la noción convencional de valor agregado ignora otros elementos que también otorgan valor a los bienes. Para el ejercicio de la evaluación de dos alternativas de sistema de transporte, esto se evidenció al plantear una identidad termodinámica que expresase el valor agregado en unidades energéticas. Entonces se pudo apreciar elementos cualitativos interesantes que diferenciaban a los autobuses de motor eléctrico de aquellos con motor a diesel y que permitían evaluar, por ejemplo, la eficiencia termodinámica de ambos sistemas y las ventajas que cada uno de ellos presentaba en términos de asignación eficiente de los recursos energéticos.

Para ilustrar el caso del comercio exterior, es útil plantear un ejemplo. El Ecuador es un importante exportador mundial de camarón y este producto constituye actualmente un rubro esencial en su balanza comercial. El camarón se considera un bien de escaso valor agregado porque el producto final no pasa por un proceso productivo complicado. El precio internacional del bien ha mantenido una tendencia creciente durante los últimos veinte años, lo cual ha incentivado a que se incorporen nuevos productores al mercado mundial, como ha sido el caso del Ecuador. Por tanto, ha existido un incentivo permanente para

incrementar tanto el volumen exportado como el número de productores. Para elevar la producción, se han ampliado las zonas de cultivo y se han utilizado métodos de producción intensiva.

La producción de camarón ecuatoriano ha proporcionado beneficios privados a sectores minúsculos relacionados con esta actividad que no demanda mayor empleo de mano de obra. Sin embargo, también ha significado costos externos importantes para la sociedad, los mismos que no han sido compensados ni asumidos por ningún agente privado. En términos de costos de oportunidad, la producción camaronera ha exigido convertir cientos de hectáreas de manglar en piscinas de cultivo, reemplazando la diversidad biológica de ese complejo ecosistema por sistemas poco heterogéneos, característicos de monocultivos. La producción de camarón ha agotado rápidamente los nutrientes del suelo ocupado por las piscinas, favoreciendo la desertificación de la costa ecuatoriana. Este resultado es característico de actividades intensivas en el uso de los recursos naturales que exigen, una vez agotado el ecosistema, la ampliación de la frontera explotada. La captura selectiva de la larva de camarón ha producido cambios en los ecosistemas costeros ecuatorianos, en los cuales cada especie cumple una función que asegura la reproducción del sistema en su conjunto. Estos son solamente algunos ejemplos de las externalidades ambientales producidas por esta actividad económica. Desde el punto de vista social, la producción camaronera ha exacerbado una serie de conflictos entre los actores locales, las empresas y el Estado.

Se desprende, entonces, que cuando el Ecuador exporta camarón, agota la fertilidad del suelo de sus costas, la diversidad biológica de su litoral y el equilibrio de su ecosistema marino. Todos estos elementos son imposibles de sustituir y en el corto plazo ni siquiera pueden regenerarse pues tienen tiempos de reproducción geológicos. Para la producción camaronera ecuato-

riana, la externalización de los costos ambientales y sociales de esta actividad ha constituido una ventaja comparativa que permite el posicionamiento comercial del Ecuador en la economía internacional.

¿Está reflejado este costo de oportunidad en el precio al cual el país vende su producción camaronesa? Si esta actividad está agotando la riqueza del ecosistema de la Costa ecuatoriana, su capital natural, ¿está el país invirtiendo en no depreciar ese stock de capital? Los beneficiarios privados de las rentas producidas por la exportación de camarón ¿compensan a quienes se ven afectados por los costos externos de esta actividad que se socializan entre todos los ecuatorianos? ¿Cuántos años más puede mantenerse el sector exportador ecuatoriano en una producción intensiva y vulnerable (el Síndrome de Taura lo demostró), imposible de auto sostenerse en el mediano y largo plazo? Y finalmente, ¿qué oportunidades tendrán los ecuatorianos del próximo milenio para satisfacer sus necesidades de subsistencia en el empobrecido ecosistema costero, producto de la actividad camaronesa?

Lamentablemente, parecería que responder a las preguntas planteadas en el párrafo anterior conduce a un panorama poco alentador, resultado de una asignación ineficiente de los recursos. Los países en los cuales los recursos naturales ocupan un lugar importante en sus exportaciones deberían contar con un mayor conocimiento sobre la intensidad del uso y el nivel de acervos de capital natural disponibles para aspirar a un desarrollo sostenible. Sin embargo, esta no es la situación ni del Ecuador ni de la mayor parte de los países latinoamericanos.

El desarrollo sostenible exige abordar estos problemas y darles una solución oportuna. Y una vez más, surge la necesidad de enriquecer el análisis económico con nuevos elementos de juicio. En este problema de asignación, es evidente que el merca-

do ha sido insuficiente para dar las señales adecuadas a los agentes económicos. Una vez más, la incorporación de indicadores físicos, basados en el análisis termodinámico, permitiría mejorar la calidad de las decisiones económicas de asignación.

Es curioso que esta lectura de varios conceptos de la economía desde la Termodinámica conduzca siempre al mismo destino: a la necesidad de ampliar el objeto de estudio de la economía hacia la realidad material de la vida en el planeta.

C. Una cuestión de información y creatividad

En el Ecuador, los costos generados por la mayor parte de las externalidades de los procesos productivos no se han incorporado en los precios de los bienes que se fabrican en aquellos procesos. Por tanto, los instrumentos monetarios construidos a partir de los precios son insuficientes para pensar en la sustentabilidad del desarrollo del país. Y lo que es aún más grave, esos mismos precios proporcionan señales erróneas a los agentes económicos, quienes no cuentan con información apropiada para adoptar las mejores decisiones de asignación de los recursos.

Este trabajo ha desarrollado tres ejercicios en los que se emplearon instrumentos poco convencionales del análisis económico. Se partió de una interpretación termodinámica de los procesos productivos, en la cual la eficiencia está estrictamente vinculada con la minimización de la entropía, producto de las actividades humanas (el ahorro de exergía). Este enfoque de análisis ha enriquecido la comprensión y la interpretación de los procesos productivos propuestas en este trabajo.

El primer ejercicio microeconómico, la aplicación de la Teoría General del Ahorro de Exergía al análisis del sistema de transporte del Distrito Metropolitano, ilustra con claridad las ventajas y desventajas de los distintos tipos de energía que ali-

mentan a los sistemas de transporte en términos de eficiencia y rentabilidad. El análisis desarrollado proporciona varios elementos cualitativos para enriquecer una evaluación sobre los efectos que tuvo la instalación del Sistema Trolebús en el bienestar de la comunidad.

El segundo ejercicio microeconómico, en el cual se emplea la huella ecológica en la comparación de los dos tipos de sistemas de transporte, demuestra la intensidad energética global de uno y otro proceso. Este aspecto es de suma importancia si se considera que el Distrito Metropolitano no se abastece por sí solo ni de energía eléctrica ni de combustible fósil, sino que su consumo de estos productos depende de otras regiones. Por tanto, desde la perspectiva del desarrollo regional, este instrumento presenta mucha utilidad para identificar los principales flujos de intercambio material.

El ejercicio macroeconómico de análisis de los coeficientes técnicos de la Matriz Insumo-Producto ecuatoriana proporciona una serie de elementos característicos de la estructura energética del país. Este ejercicio ilustra con mayor claridad que los anteriores la necesidad de contar con información física agregada que describa con precisión los procesos productivos del país.

Como se advirtió en cada uno de los ejercicios, éstos constituyen simplemente ensayos para ilustrar la utilidad del análisis termodinámico en el estudio de los procesos productivos. También ayudan a identificar los límites de la teoría y los instrumentos utilizados, así como las necesidades en términos de información para desarrollar ejercicios más precisos. Esta investigación no pretende ser, en ningún momento, un producto terminado.

Cada vez con mayor frecuencia, el país enfrenta de serios conflictos sociales originados en torno a problemas ambientales

y de asignación de recursos. La escasa capacidad de las instituciones del Estado para resolver esos conflictos ha llevado a los ciudadanos a buscar sus propios mecanismos de defensa. Muchas veces este tipo de resolución de conflictos resulta en manifestaciones de violencia y en abusos sobre los derechos de propiedad. No existen reglas del juego establecidas ni garantías para los sectores más indefensos. Sin lugar a dudas, la presión del crecimiento de la población sobre los recursos limitados del país es un elemento de conflicto que se agudiza progresivamente.

Al inicio de este trabajo, uno de los autores citados sugería que el origen de todos los conflictos sociales se encuentra en la lucha humana por la apropiación de gradientes de energía. Esta situación es evidente en países como el Ecuador, donde la mayor parte de la población no tiene resuelto ni siquiera su problema cotidiano de subsistencia. Por tanto, es una necesidad urgente que el país asuma con seriedad la responsabilidad de pensar y llevar a la práctica un modelo de desarrollo sostenible. Y para lograrlo, se ha demostrado que los instrumentos convencionales de análisis económico son insuficientes. La reflexión y los ejercicios desarrollados en este trabajo han intentado justificar este argumento y proporcionar elementos teóricos y prácticos que enriquezcan, con creatividad, la comprensión de los procesos de transformación material. Si en alguna medida invitan al lector a ampliar el enfoque con que se abordan los temas del crecimiento, el desarrollo y el bienestar y a incorporar en ellos aspectos cualitativos, habrán cumplido su objetivo.

BIBLIOGRAFÍA

Amigos de la Tierra

1994 *Hacia una Europa Sostenible: El Manual.*

Banco Central del Ecuador

1996 *Cuentas Nacionales del Ecuador 1972 – 1995*, No. 18, Quito.

Claude, Marcel y Pizarro, Rodrigo

1995 “Indicadores de Sustentabilidad y Contabilidad Ambiental para el Caso Chileno”, *Sustentabilidad Ambiental del Crecimiento Económico Chileno*, Programa de Desarrollo Sostenible del Centro de Análisis de Políticas Públicas de la Universidad de Chile, Santiago.

Claude, Marcel

1996 *Sustentabilidad y Desarrollo Económico: Elementos para el Debate*, documento sin publicar.

Da Ros, Giuseppina Sara y Marconi, Salvador

1997 “Cuentas Ambientales: el Estado del Arte”, *Laboratorio de Economía No. 1*, Quito, Facultad de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Daly, Herman

1995 “Against Free Trade and Economic Orthodoxy”, *The Oxford Economic Review*, número de verano.

Deshmunkh, Ian

1986 *Ecology and Tropical Biology*, Blackwell Scientific Publications, USA.

Faber, M., Niemes, H., Stephan, G.

1987 *Entropy, Environment and Resources: An Essay in Physico-Economics*, Springer - Berlag, Berlín.

Georgescu-Roegen, Nicholas

1996 *La Ley de La Entropía y el Proceso Económico*, España, Fundación Argentaria y Visor.

Goodland, Robert

1995 *Environmental Sustainability: Universal and Rigorous*, Washington DC, World Bank.

- 1994 "El Argumento Según el Cual el Mundo ha Llegado a sus Límites", *Desarrollo Económico Sostenible: Avances sobre el Informe Brundtland*, Bogotá, Ediciones Uniandes-Tercer Mundo Editores.
- 1975 "Energía y Mitos Económicos", *Southern Journal*, número de enero.

Hinterberg, F., Luks, F., Schmidh-Bleek, F.

- 1995 *What is Natural Capital?*, Wuppertal Institute, marzo.

León Patricio y Marconi, Salvador

- 1991 *La Contabilidad Nacional: Teoría y Métodos*, Quito, PUCE.

Martínez Alier, Joan

- 1995 *De la Economía Ecológica al Ecologismo Popular*, Montevideo, Nordan Comunidad.
- 1991 *La Ecología y la Economía*, México, Fondo de Cultura Económica.

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

- 1997 *Información Básica sobre el Distrito Metropolitano de Quito y su Municipalidad*, boletín de abril.

Naciones Unidas

- 1994 *Contabilidad Ambiental y Económica Integrada*, versión provisional, Nueva York.

Naredo, José Manuel y Valero, Antonio

- 1989 "Sobre la Conexión entre Termodinámica y Economía Convencional", *ICE*, junio - julio.

National Geographic y El Comercio

- 1994 *Atlas Ilustrado de Nuestro Mundo*, Quito, El Comercio.

OLADE

- 1996 *Energía en Cifras*, Sistema de Información Económica Energética, Quito, boletín de julio.

Peezey, John

- 1992 *Sustainable Development Concepts: An Economic Analysis*, Washington DC, World Bank Environment Papers.

- Quiroga, R. y Van Hauwermeiren, S.
1995 *Globalización e Insustentabilidad: Una Mirada desde la Economía Ecológica*, Santiago de Chile, Instituto de Ecología Política.
- Rees, William y Wackernagel, Mathis
1996 *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, Canadá, New Society Publishers.
- Spangenberg, Joachin
1996 *Proactive Interlinkage Performance Indicators: A Compass on the Road towards Sustainability*, Wuppertal Institute, junio.
- Spangener, J., Femia, A., Schmidt-Bleek, F.
1995 *Concepts for Sustainability: Environmental Space, Material Flows and SD-Indicators*, Sustainable Societies Steering Committee, Holanda, borrador de uso interno.
- Statistisches Bundesamt
1996 *Statistisches Jahrbuch 1996 für die Bundesrepublik Deutschland*, Metzler-Poeschel.
- Van Hauwermeiren, Saar
1995 *El Comercio Justo como alternativa para avanzar hacia la sustentabilidad del desarrollo*, Santiago de Chile, Instituto de Ecología Política, agosto.
- Van Hauwermeiren, Saar, y de Wel, Bert
1995 *Questioning Europe's Unequal Ecological Exchange: The Chilean Case*, Santiago de Chile, Instituto de Ecología Política, mayo.
- Valero, Antonio
1993 "La Termodinámica: ¿Una ciencia de los Recursos Naturales?, Naredo y Parra (compiladores), *Hacia una Ciencia de los Recursos Naturales*, Madrid, Siglo XXI Editores.
- Valero, Antonio, Ranz, L., Subiela, V.
1996 *Cuantificando el Capital Natural: Una Aproximación no Monetaria*, Zaragoza, Centro de Investigación del Rendimiento de Centrales Eléctricas, versión sin publicar.
- Varian, Hal
1992 *Análisis Microeconómico*, Barcelona, Antoni Bosch editor.

Vitousek, P., Ehrlich, P., Ehrlich, A., Matson, P.

- 1986 "Human Appropriation of the Products of Photosynthesis", *BioScience*, volumen 36, número 6.

Vogel, Joseph Henry

- 1991 "Uninvited Guests: A Thermodynamic Approach to Resource Allocation", *Prometheus*, volumen 9, número 2, diciembre.
- 1989 "Entrepreneurship, Evolution, and the Entropy Law", *The Journal of Behavioral Economics*, volumen 18, número 3.
- 1988 "Evolution as an Entropy Driven Process: An Economic Model", *System Research*, volumen 5, número 4, Gran Bretaña.

Von Weizsacker, Ernst y Jesinghaus, Jochen

- 1991 *Ecological Tax Reform: a policy proposal for sustainable development*, Institute for European Environment Policy y Wuppertal Institute, Londres.

ANEXOS