



"LA MODELIZACIÓN COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD"

José Juan de Felipe Blanch

Cátedra UNESCO de Sostenibilidad
Universidad Politécnica de Cataluña

Resumen:

Este trabajo se ha realizado en el seno de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad, unidad básica de la Universidad Politécnica de Cataluña. La Cátedra UNESCO de Sostenibilidad tiene un grupo de trabajo, el cual trabaja en la medida y modelización de la Sostenibilidad, específicamente este grupo de trabajo ha desarrollado el presente trabajo.

Uno de los principales objetivos de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad es aumentar el conocimiento de las generaciones futuras de ingenieros en el concepto del desarrollo sostenible. Intenta aumentar el conocimiento de este concepto en el sentido más amplio, y no solamente en los campos en los cuales se incorpora tradicionalmente en la educación de la ingeniería, tales como los estudios de impacto ambiental de las tecnologías y su posible mitigación. En vez de ello, el objetivo es enseñar las implicaciones en todas las dimensiones del desarrollo sostenible: aspectos sociales, medio ambientales y económicos y sus relaciones con la tecnología.

Debido a la dificultad de la medida del desarrollo sostenible, y la incertidumbre que representa la utilización de las tecnologías con el fin de alcanzar la sostenibilidad, nosotros presentamos a nuestros estudiantes de ingenierías un marco de trabajo para el estudio de sistemas complejos [1][2] por medio de la “Dinámica de Sistemas”. Usando esta metodología, internacionalmente reconocida [3], se estudian y analizan varios problemas de sostenibilidad, identificando sus variables básicas o de nivel y observando su influencia en el comportamiento del sistema complejo. Simultáneamente, podemos observar la influencia de las diferentes tecnologías usadas en los diferentes modelos de desarrollo. Nosotros ilustraremos la aplicación de esta metodología con un caso concreto.

Hemos comprobado que usando esta metodología, los estudiantes amplían su visión del desarrollo sostenible, con una visión mas global, humanista y ampliamente multidisciplinar en concordancia con las referencias educativas de las cumbres de Rio de Janeiro [4] y de Johannesburg [5]

EL DESARROLLO SOSTENIBLE DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS SISTEMAS

La evolución del concepto de sostenibilidad desde que apareció acuñado en el informe Brundtland [6], ha ido evolucionando hasta las definiciones aparecidas posteriormente, en años más recientes [7].

Si analizamos este concepto desde el punto de vista de los sistemas, el desarrollo sostenible representa la evolución de un sistema extremadamente complejo, cuyo objetivo es el de perdurar a través del tiempo (supervivencia). En las definiciones clásicas de este concepto se interpreta que la sostenibilidad se debe dar en unas determinadas dimensiones para considerarlo como tal, así, se habla de las dimensiones social, económica y medio ambiental, que no son ni más ni menos que una simplificación del sistema complejo, que forma la especie humana (con todas sus “dimensiones”) junto con el medio ambiente en el cual vivimos (el planeta Tierra), reconociendo la profunda interrelación que existe entre ambos subsistemas.

La aparición del propio concepto de “Desarrollo Sostenible” y su evolución en estos últimos 20 años, demuestra la preocupación existente, como mínimo, en el mundo académico, de que la marcha actual del sistema complejo humanidad-medio ambiente puede provocar el colapso y/o destrucción del mismo, si se sigue desenvolviendo bajo el actual modelo de desarrollo occidental. Existen evidentes indicios negativos del efecto del desarrollo antropogénico sobre el medio ambiente, que incluso afectan a los ciclos naturales de los elementos químicos: ciclo del agua, con la degradación permanente de esta; ciclo del carbono, con el aumento de la concentración de éste en el reservorio atmosférico; el ciclo del nitrógeno, con los problemas de degradación del suelo cultivable por aumento de la concentración de nitrógeno, etc.

La respuesta clásica ante este tipo de problemas deriva de la manera de afrontar la resolución bajo el paradigma newtoniano-cartesiano, desarrollado bajo los auspicios de la revolución científico-técnica que comenzó en el siglo XIV [8].

La clásica respuesta para cada problema que plantea el desarrollo humano consiste en buscar una solución dentro de una disciplina específica, en la cual son conocidos los efectos negativos del problema. Este procedimiento clásico origina, en general, soluciones parciales, que en muchas ocasiones producen otros efectos no deseados en diferentes elementos del sistema, ya sea en el presente, o perturbando la evolución de estos en el futuro. Ello se debe a que se afronta un problema complejo a través de extremas y parciales simplificaciones, como propone el método cartesiano [9].

Por otra parte, la revolución científico-técnica, que indudablemente ha producido una enorme evolución del sistema humanidad, ha auspiciado a la tecnología como la herramienta más eficaz para resolver los problemas del desarrollo humano, dando a esta un carácter casi místico [10]; cuando desde el punto de vista de los sistemas, la tecnología no deja de ser una forma de relación entre los dos subsistemas comentados, el subsistema humano y el subsistema medio ambiente.

En función de la tecnología utilizada se producirá una determinada evolución en el sistema humano y unos efectos (impactos) en el medio ambiente.

Aunque observando nuestro pasado reciente, nos damos cuenta que a pesar de los grandes avances científicos y técnicos que han tenido lugar, los problemas de la humanidad no han disminuido, sino todo lo contrario, se han acrecentado, así tenemos mayores desequilibrios entre el norte y el sur, mayor desigualdad en el reparto de riqueza, y otros tantos problemas, conocidos por todos.

Por tanto, la tecnología no es la panacea que nos librará de todos los males que padece la humanidad, lo cual está en contradicción con el sentir de parte de la humanidad actual.

NECESIDAD DE PREVER EL FUTURO

Por otra parte, indudablemente se ha de analizar el papel de las tecnologías en el modelo de desarrollo actual. Para tal análisis es necesario de un cambio de paradigma, el paso del paradigma newtoniano-cartesiano al paradigma sistémico, el paso de los análisis unidisciplinarios a los análisis multidisciplinarios.

Uno de los enfoques que nos permiten realizar el análisis de la tecnología bajo el paradigma sistémico, es realizarlo dentro del marco de los sistemas complejos. Para ello, es necesario utilizar y conocer, tanto los conocimientos básicos, como de las herramientas adecuadas para la representación y resolución de tales sistemas. Todo ello, con el objeto y fin último, de mejorar los procesos de decisión en la elección de las diferentes tecnologías que permitan el cambio del modelo de desarrollo.

Hoy en día, resulta evidente la necesidad de prever futuros impactos de las tecnologías, tanto en el medio ambiente como en la humanidad. Estas tecnologías en un futuro cercano serán esenciales para nuestra sociedad. Por ello, es esencial que los procesos de decisión sobre el desarrollo y/o utilización de una determinada tecnología no estén basados en razones puramente económicas, y a corto plazo, como ocurre, generalmente, hoy en día, sino que contemplen un punto de vista multidisciplinar (económico, social y medio ambiental), previendo los posibles impactos a largo plazo. Nace la necesidad de prever el futuro.

Para poder prever el futuro es necesario crear modelos de comportamiento dinámico (temporal) de los sistemas complejos en los que está inmersa la humanidad, en los cuales podamos identificar las fuerzas motoras de los diferentes problemas de carácter global o regional, y aplicando diferentes hipótesis de evolución de las variables del modelo, prever como evolucionará el sistema. Con ello, se establece un proceso mediante el cual se aprende el funcionamiento del sistema (como evoluciona), y por tanto, estamos en mejores condiciones, en el presente, para tomar decisiones que afectan a nuestro futuro. Además de tener un valor añadido, ya que es una técnica eminentemente de autoaprendizaje.

METODOLOGÍAS DE REPRESENTACIÓN DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS: MODELIZACIÓN

Hasta el día de hoy se han desarrollado diversas metodologías para la representación y resolución de los sistemas complejos, todas ellas basadas en la modelización, construcción de modelos más o menos complejos y con más o menos acierto, que corren en ordenadores, aprovechando la alta capacidad de manejo de información y rapidez de cálculo que permiten estas tecnologías.

Podemos clasificar estas metodologías en tres grandes tipos:

- Econometría.
- Dinámica de Sistemas.
- Redes Complejas.

La primera metodología consiste en técnicas estadísticas que intentan encontrar relaciones entre los diferentes elementos que conforman un sistema, son técnicas desarrolladas por las Ciencias Económicas. El problema que plantean es que no valoran

las diferentes propiedades que pueden tener intrínsecamente los elementos del sistema. En nuestro ejemplo presentamos estas técnicas y las empleamos específicamente para crear modelos reducidos de tipo “caja negra”, aplicados a través de un software denominado “GlobeSight”, desarrollado en la Case Western Reserve University de Ohio por el Dr. M. D. Mesarovic (coautor del segundo informe al Club de Roma [11]).

La segunda metodología, “Dinámica de Sistemas”, es una técnica de representación gráfica de los sistemas complejos, en donde se identifican los elementos, las denominadas variables de nivel, y sus relaciones con el resto de elementos del sistema, tanto materiales como de información. Esta técnica fue desarrollada por Forrester en los años 60 del siglo pasado [12], y ha sido la base de los famosos modelos globales de Meadows (autor del primer informe al Club de Roma [13]). Esta segunda metodología, también se utiliza en el ejemplo, para crear modelos que implementamos en un software específico denominado “VENSIM SPL”.

Por último, existe una tercera metodología desarrollada en años más recientes, en la cual los elementos que forman los sistemas complejos se consideran nodos, y las relaciones (tanto materiales como de información) entre ellos, crean una red. El estudio se centra en como evoluciona la red, así como en las propiedades de las conexiones entre los nodos. Es una técnica con un futuro prometedor ya que enlaza perfectamente con la nueva tecnología de la información denominada “Sistemas de Información Geográfica”.

EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE EMISIONES

El cambio climático inducido por la actividad humana es el primer ejemplo de la interdependencia global, de la globalización de los problemas.

El cambio en el clima, no es un fenómeno nuevo en sí mismo. El clima es un sistema complejo muy dinámico, que ha variado a través de la historia de la Tierra, en todas las escalas temporales, así, tenemos los últimos períodos glaciares y los períodos cálidos interglaciares como el actual (Holoceno), que se han alternado en los últimos cien mil años. También hay enfriamientos parciales de la atmósfera debido a violentas erupciones volcánicas, efectos sobre el clima que duran breves años (erupción del Monte Pinatubo, Filipinas 1991), y como estas evidencias, muchas más, que existen en la bibliografía especializada.

A pesar de esta extensa variabilidad del clima, existen verdaderos indicios, sobre todo en las últimas décadas, de que hemos entrado en un proceso acelerado de cambio climático, basado sobre todo en las observaciones realizadas de la variación de las características físicas de la atmósfera, así como de la flora y fauna en diversas partes del mundo. El principal e incontestable cambio climático, es la observación, por diversas fuentes independientes, del aumento de la temperatura media de la corteza terrestre (una media de 0,6 °C) en el último siglo, la constatación que la década de los 90 ha sido la más cálida del milenio, y que, en esta década y en los primeros años del siglo XXI tenemos los tres años más calurosos de todo el siglo (1998, el 2001 y el 2003), así como un aumento imparable de la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera.

El aumento de concentración del conjunto de gases efecto invernadero es causado por diversas actividades humanas, principalmente por la quema de combustibles fósiles y por el cambio del uso de la tierra y la agricultura [14].

Así la concentración de dióxido de carbono se ha incrementado desde las 280 ppmv en el periodo preindustrial (1750), hasta 370 ppmv en el presente año (2003). Con las tendencias presentes, la concentración que se podría alcanzar en el año 2100 variaría entre las 540 a las 970 ppmv [15], según los diversos escenarios realizados por el IPCC (Internacional Panel Change Climate), organismo de asesoramiento científico para el cambio climático de la Organización Meteorológica Mundial (ONU).

Los grandes modelos climatológicos predicen toda una serie de cambios que pueden afectar el futuro clima. Los más importantes los enumeraremos a continuación, tal como lo hace la WMO (World Meteorological Organization).

- Un aumento medio, a finales del siglo XXI, de la temperatura de la superficie de la Tierra entre 1,4 y 5,8 °C. Este incremento es mucho más fuerte que el padecido en el siglo XX, y el mayor ocurrido en los últimos 10.000 años.
- El nivel del mar se espera que se eleve entre 0,09 y los 0,88 m respecto al nivel del año 1990, a finales de la centuria.
- Un aumento de la evaporación y de las precipitaciones, pero afectando desigualmente a las diferentes regiones del mundo.
- Días más cálidos, y olas de calor más frecuentes. Las temperaturas mínimas más altas.
- Mayores precipitaciones de carácter violento.

Todos estos fenómenos provocarían toda una serie de efectos sobre la población humana.

- Peligro en la seguridad alimentaria de muchas regiones, sobre todo en las regiones áridas y pobladas, en donde la presión, tanto climatológica como demográfica, podrían ponerla en peligro.
- Peligros en los recursos de agua dulce, ya que aunque se prevé un aumento global de las precipitaciones de entre un 5 y un 10 % a finales de siglo, esta no se distribuirá de forma homogénea, si no que se concentrará sobre todo en las latitudes medias del Norte, en África tropical y en la Antártica, disminuyendo en Australia, Centroamérica y sureste africano.
- La salud humana también se verá afectada, sobre todo, por los efectos de calor en las grandes urbes, la extensión a otras latitudes de plagas, etc., dependiendo su impacto de las condiciones económicas, culturales y medioambientales de la población.
- Impactos por la elevación del nivel del mar, sobre áreas generalmente muy fértiles y zonas densamente pobladas [16].

Las emisiones de dióxido de carbono antropogénicas debidas a la quema de combustibles fósiles se encuentran relacionadas directamente (existe una clara proporcionalidad), con el crecimiento económico y el grado de desarrollo de los países o regiones. Cuando un determinado país o región posee un fuerte crecimiento económico, este se basa en la utilización de una forma intensiva de la energía, y esta, en su mayor parte proviene de la quema de los combustibles fósiles [17]. Esta fenomenología se debe principalmente, al modelo energético imperante en nuestros días, que se basa en el consumo intensivo de energías no renovables, cuyas características son su disponibilidad en el tiempo y en el espacio, y su relativamente fácil distribución. También depende del

propio modelo económico neoliberal, una de cuyas premisas es la no regulación o restricción del consumo [18], propiciando la producción masiva de productos, y para poder realizarla, es necesaria la industrialización, transporte y distribución, dimensión que consume grandes cantidades de energía. Se sustituye la energía de origen animal, o humana, o renovable, o las fuentes de energías de baja densidad, discontinuas en el tiempo y altamente aleatorias (energías renovables) por energías de alta densidad, de alta disponibilidad, abundantes y con altas tasas de reposición (que generalmente son las energías no renovables) y de precio barato [19].

Por otra parte, las emisiones debidas a la deforestación, se encuentran claramente ligadas de manera inversamente proporcional al grado de desarrollo de un país o región, y de forma proporcional a la presión demográfica, así como a la cantidad de bosques que poseen. Cuando más pobres o menos desarrollados económica y socialmente son los países, los bosques son uno de los recursos básicos que se utilizan para la propia subsistencia, así también, los bosques son utilizados como concesiones a la industria maderera para el pago de la deuda externa de estos países o regiones. Estos hechos provocan deforestaciones importantes, y consecuentemente, se produce una liberación de carbono a la atmósfera en forma de emisiones.

Este fenómeno, las emisiones por deforestación, posee una proporcionalidad con la cantidad de bosques que posee un país, así, países ricos en bosques y en vías de desarrollo poseen tasas de emisiones por deforestación relativamente más elevadas que otros países con características similares, tanto en aspectos económicos como sociales, pero que poseen menos cantidades relativas de bosque.

Las absorciones se deben sobre todo a dos fenómenos, por un lado a la propia extensión boscosa de los diferentes países o regiones, es decir, las hectáreas de los diferentes tipos de bosque que poseen, y por otro lado al grado de fijación del CO₂, que depende a su vez de la edad y tipología del bosque.

Así bosques jóvenes, en crecimiento, fijan más carbono que bosques viejos y maduros, en donde prácticamente existe un equilibrio entre las emisiones y absorciones. Los bosques nuevos que han aparecido en las tierras de labor abandonadas, son bosques generalmente del hemisferio norte, que coincide geográficamente con los países industrializados, estos bosques tienen un alto grado de fijación del carbono, que disminuye aproximadamente con la latitud, así los bosques templados nuevos tienen un mayor grado de fijación que los bosques boreales nuevos [20].

A nivel mundial, quedan definidos por tanto, dos tipos diferentes de absorciones, las principales que fijan aproximadamente una cuarta parte del carbono total emitido por fuentes antropogénicas, que son debidas a las zonas boscosas, y que se concentran en las zonas tropicales y en menor medida las boreales, que coinciden con países en vías de desarrollo y países en transición económica (La Federación Rusa), y las absorciones debidas a la reforestación que con un peso del 10 % de todas las absorciones, se concentran en el hemisferio norte, en los países industrializados [21].

En esta ponencia presentamos un modelo de dinámica de sistemas implementado en un software específico denominado "Vensim". El objeto del modelo es crear un escenario de futuro, desde el año 2003 al 2100, en donde se puedan visualizar las emisiones de CO₂. El principal causante del aumento medio de la temperatura terrestre y por consiguiente del cambio climático.

Hipótesis de funcionamiento del modelo

El modelo desarrollado en dinámica de sistemas es un modelo sencillo que intenta relacionar a través de grandes índices e indicadores las diferentes variables del problema: población, consumo de energía, vector energético, emisiones, absorciones y masa forestal.

Las hipótesis con las que se realiza el modelo son las siguientes:

- La población humana depende de la natalidad y la mortalidad.
- Esta población humana con su actividad genera riqueza para alcanzar su nivel de bienestar, el cual mediremos a través del PIB.
- Para realizar estas actividades se consume energía.
- La cantidad de consumo de energía depende de la tecnología que se está utilizando. Este factor lo medimos a través de un indicador denominado: Intensidad energética. (Consumo de energía/PIB).
- La tecnología es representada a través del vector energético. El vector energético es el conjunto de energías primarias que se utilizan para cubrir la demanda energética. En este modelo se han considerado cuatro: carbón, petróleo, gas natural y el resto de energías primarias que se consideran que no emiten dióxido de carbono.
- Las emisiones por consumo de energía dependen de la proporción de combustibles fósiles que se utilizan para cubrir la demanda energética y el factor de emisión de estos.
- La masa forestal dependerá de la deforestación y forestación.
- La forestación depende de la masa forestal y su regeneración natural.
- La deforestación se debe sobre todo al impacto de la población humana.
- La forestación absorbe CO₂, mediante el producto del factor de absorción por los miles de hectáreas forestadas. Estas son un 1 % anual de la masa forestal.
- La deforestación produce emisiones de CO₂. Que se calcula como el producto de las miles de hectáreas deforestadas por el factor de emisiones correspondientes.

A partir de estas hipótesis se han seleccionado las variables de nivel del modelo, así como las variables de flujo de cada una de las variables de nivel, y los flujos materiales y de información entre todas las variables. Estas variables, así como las relaciones son representadas en la figura 1.

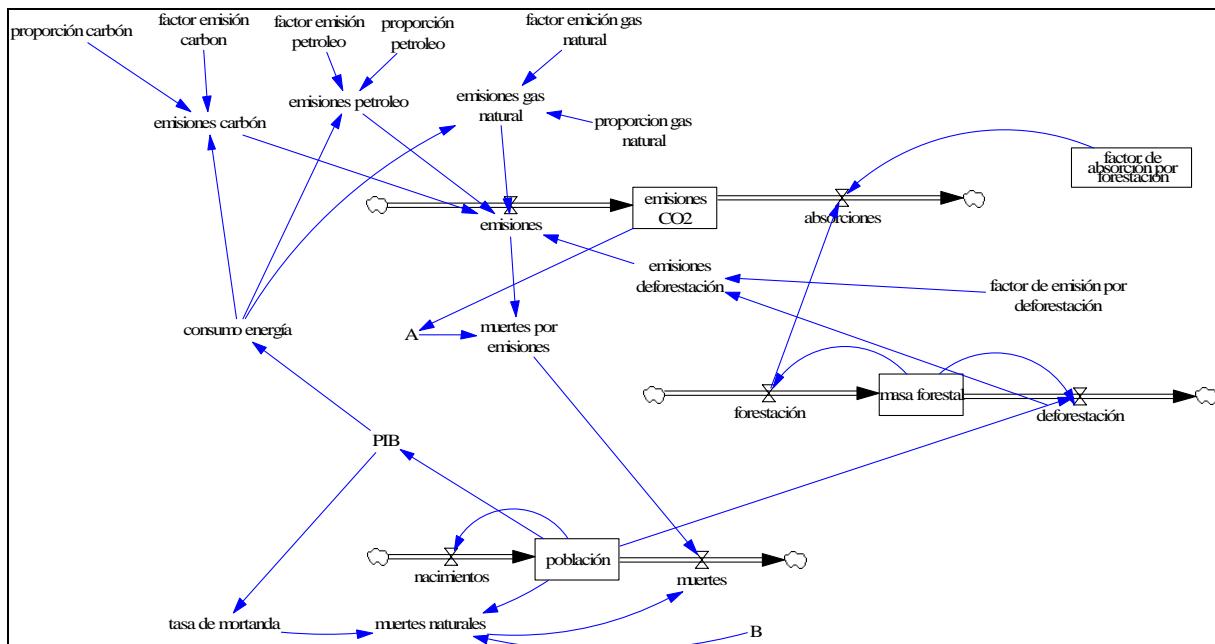


Figura 1.- Diagrama causal del modelo de emisiones y absorciones

Relaciones funcionales

Las relaciones funcionales entre las diferentes variables de flujo y variables de nivel se han determinado analizando y comparando los valores de las variables extraídas de las diferentes bases de datos consultadas.

Así, la población, PIB, consumo de energía, composición del vector energético y emisiones se han extraído de las bases de datos públicas de la EIA [22]; en cuanto a los datos de masa forestal se han extraído de las bases de datos de la FAO, "Forestry" [23].

Las relaciones funcionales entre las diferentes variables utilizadas aparecen en las figuras siguientes:

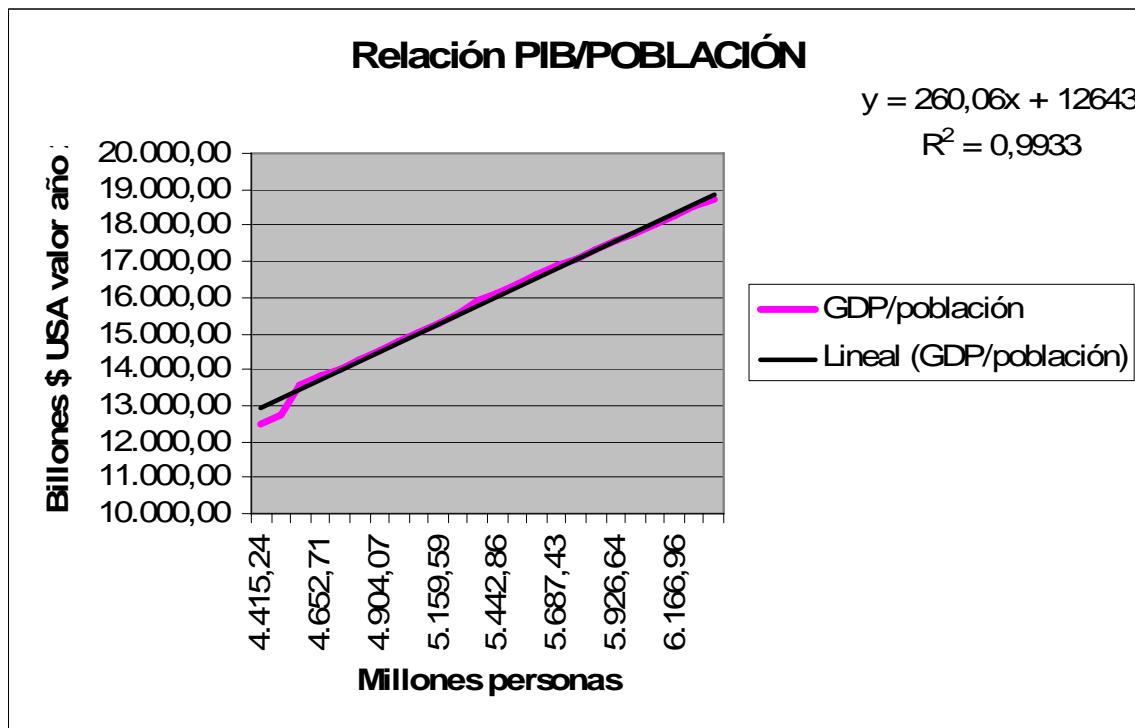


Figura 2.- Relación PIB mundial población mundial

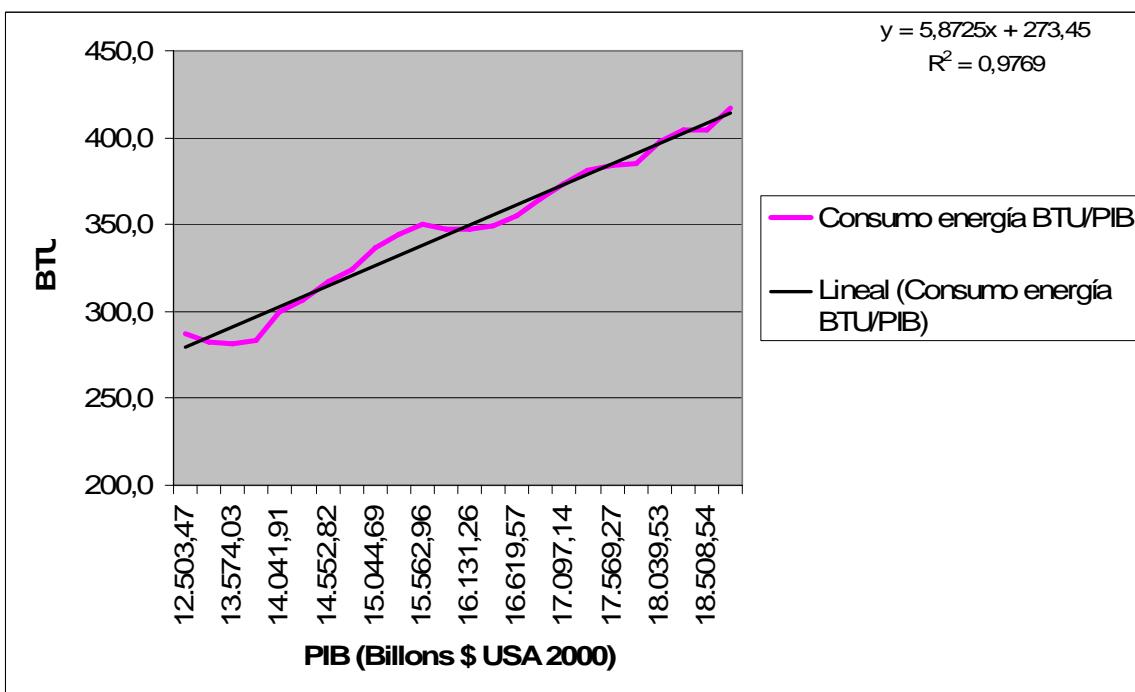


Figura 3.- Relación PIB mundial consumo de energía

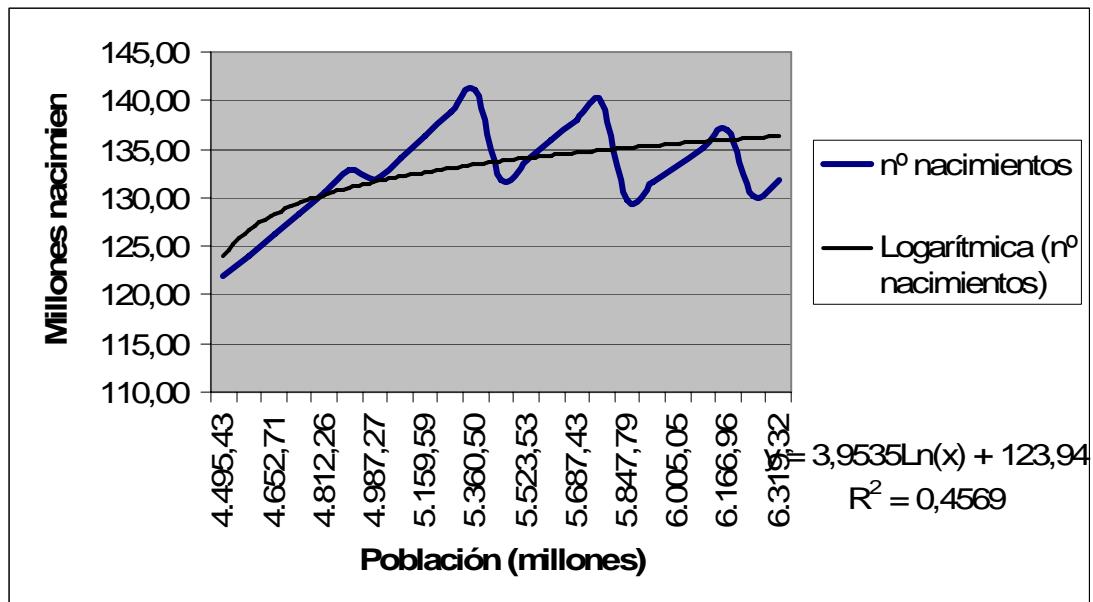


Figura 4.- Relación población mundial y nacimientos

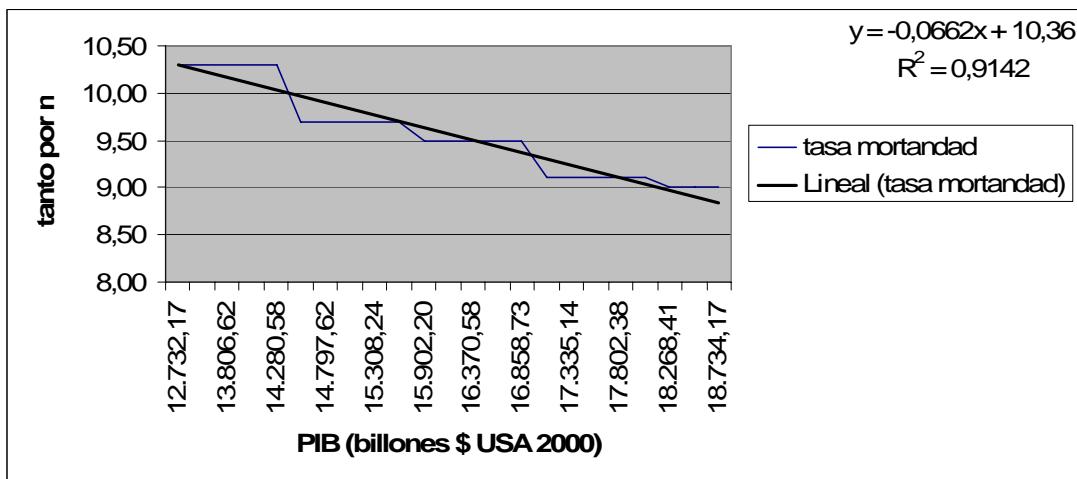


Figura 5.- Relación PIB mundial y tasa de mortalidad

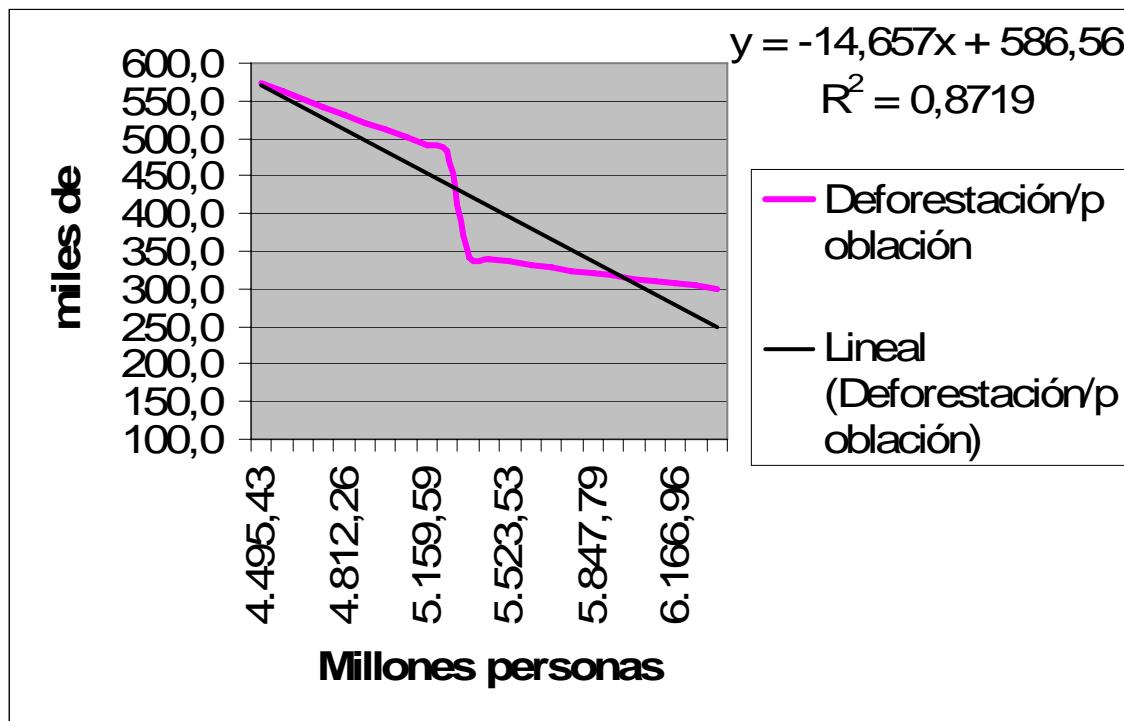


Figura 6.- Relación población mundial y miles de hectáreas deforestadas

Estas relaciones funcionales son introducidas en el modelo para simular su dinámica. Los resultados del escenario base son presentados a continuación.

Resultados simulación

Los resultados más representativos a nivel mundial: emisiones anuales, población, PIB, consumo de energía y masa forestal del escenario base o de referencia que se caracteriza por mantener las relaciones y las proporciones en el futuro igual que las del pasado (periodo 1980 al 2003), podemos observarlos en las siguientes figuras:

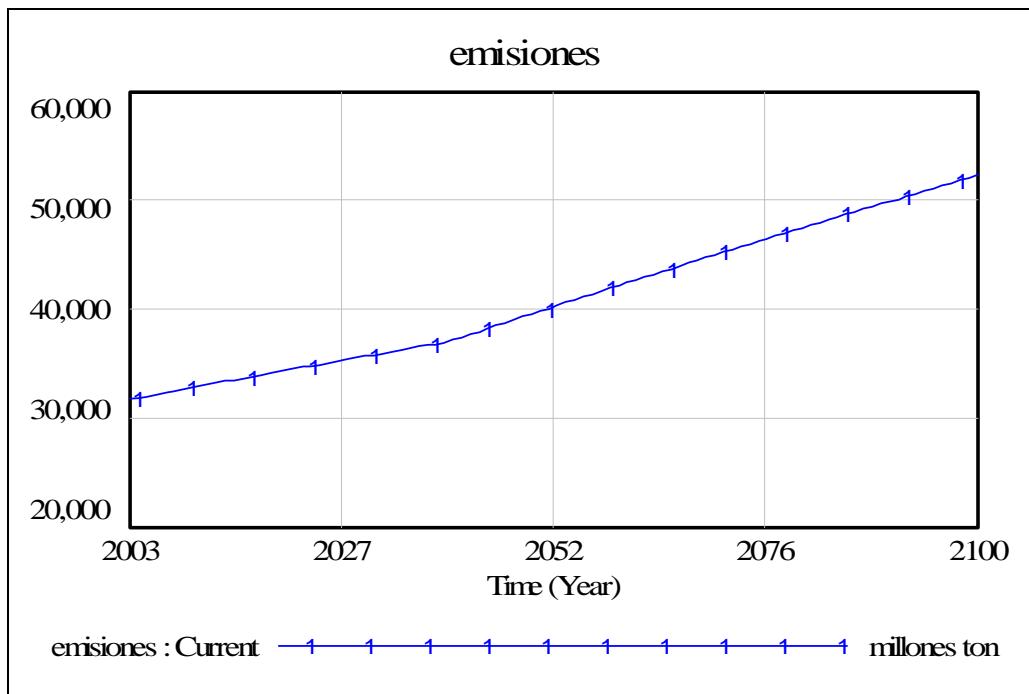


Figura 7.- Emisiones de CO₂ en millones de toneladas métricas

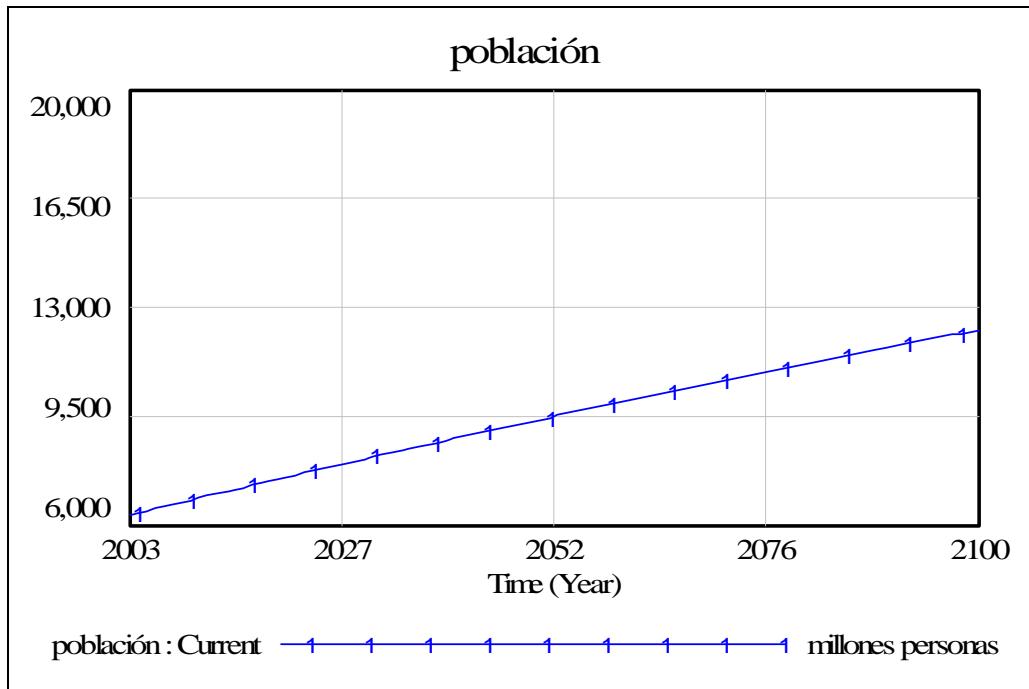


Figura 8.- Población mundial

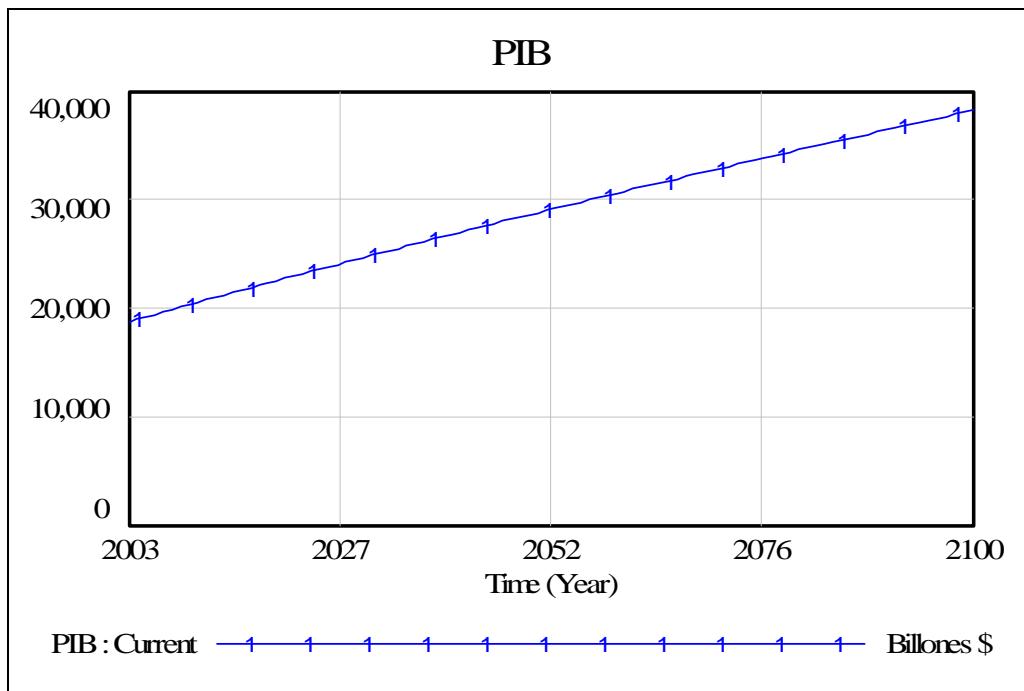


Figura 9.- PIB mundial en billones \$ USA valor año 2000

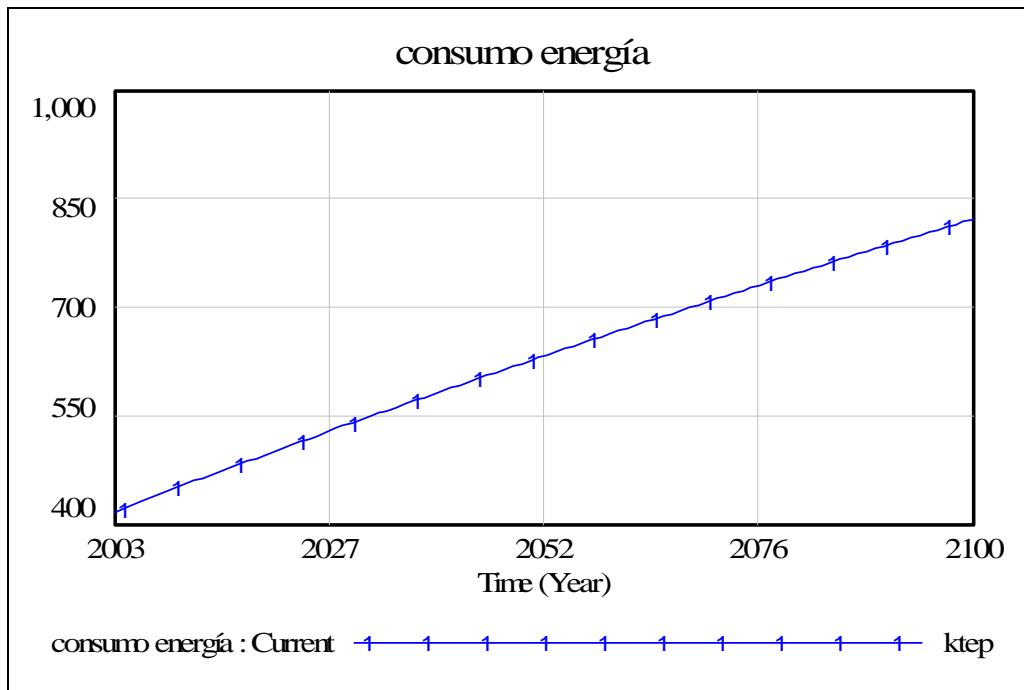


Figura 10.- Consumo mundial de energía en ktep

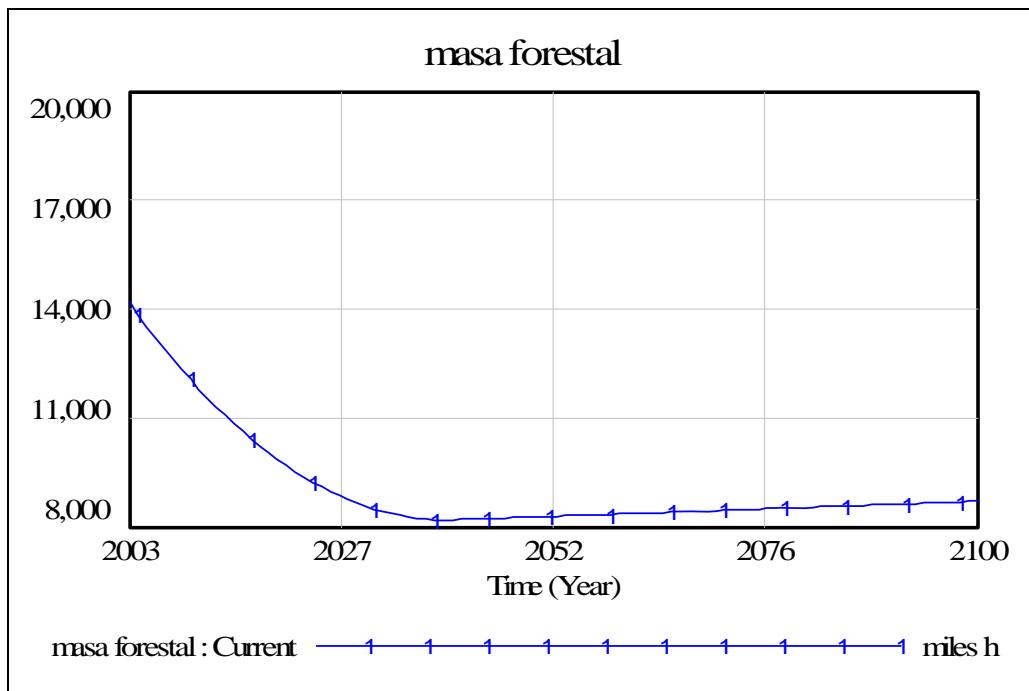


Figura 11.- Masa forestal en miles de hectáreas

Conclusiones del escenario

Los resultados del escenario de referencia se han comparado con los resultados de diversos modelos demográficos de la División de población de las Naciones Unidas, así como los resultados de los modelos de emisiones, denominados escenarios 2000 del IPCC.

Así, los resultados de población corresponderían al escenario de alto crecimiento de la población de las Naciones Unidas y los resultados de emisiones corresponderían al escenario B2 del IPCC; en donde el crecimiento económico es moderado y existe cierta preocupación medio ambiental que se traduce en acciones locales y regionales en pos de la sostenibilidad.

La tecnología energética no varía y se depende principalmente de los combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón. Cuyo consumo sigue aumentando, y provocan un elevado nivel de emisiones de dióxido de carbono.

CONCLUSIONES

Cada día los problemas con que se enfrentan tanto los ingenieros como los tecnólogos son, en general, más complicados; ya sea a nivel técnico, con máquinas y tecnologías más complejas, ya sea a nivel global, ya que tenemos la necesidad de valorar el impacto de las tecnologías en otras dimensiones, no solo la dimensión clásicamente considerada, que es la económica. Ello da lugar a una necesidad de la sociedad actual, que debe intentar cubrir la educación universitaria.

La modelización de sistemas complejos es una metodología que permite complementar la educación especializada de nuestros ingenieros, dándole contenidos transversales y

multidisciplinarios, incluso contenidos de las Ciencias Humanas, como se comprueba en el ejemplo descrito en el punto anterior.

Además, podemos concluir, que aunque el modelo desarrollado en este artículo, es un modelo muy simple, sus resultados no distan en demasiado de los grandes modelos de pronóstico y predicción que existen hoy en día. Por lo que la introducción de las otras dimensiones de la sostenibilidad dentro de la modelización, no necesariamente nos obliga a realizar modelos complicados, para prever los impactos de tecnologías en el desarrollo. Teniendo la ventaja sobre éstos de la simplicidad y por tanto de la facilidad de exponer y explicar a los centros de toma de decisiones.

REFERENCIAS

1. M.D. Mesarovic et al., GENIE, UNESCO Chair on Technology, Sustainable Development, Imbalances and Global Change, Technical University of Catalonia (UPC), 2000.
2. Ludwig Von Bertalanffy, Teoría General de los Sistemas, Fondo de Cultura Económica, México, 2003.
3. D.R. Drew, Dinámica de Sistemas Aplicada, Isdefe, 1995.
4. United Nations, Report of the United Nations Conference on the Environment and Development, Rio de Janeiro, 3-14 June 1992, Vol. I, Resolution 1, Annexes I and II.
5. United Nations, Report of the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg (South Africa), 2002.
6. Brundtland, G, H, Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, "Our Common Future", book, Oxford University Press, 1987.
7. Norton, B, B, "Sustainability, Human Welfare and Ecosystem Health", Journal, Ecological Economics, Vol 14 No 2, 1992, pp 113-127. Von Bertalanffy, L, "Teoría General de los Sistemas", libro, Fondo de Cultura Económica, 2003.
8. Crombie, A, C, "Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo", book, Alianza Universidad, 1974.
9. Descartes, R, "El Discurso del Método", book, Alianza Universidad, 1991. Drew, D,R, "Dinámica de Sistemas Aplicada", libro, Isdefe, 1995.
10. Batalla, G, "La Evolución de la Tecnología", book, Editorial Crítica, 1991.
11. Mesarovic, M,D; Pestel, E, "La Humanidad en la Encrucijada", book, Fondo de Cultura Económica, 1975.
12. Forrester, J, W, "Industrial Dynamics", book, Productivity, 1961.
13. Meadows, D, et al., "Más allá de los límites del crecimiento", book, El País/Aguilar, 1992. Norton, B, B, "Sustainability, Human Welfare and Ecosystem Health", Journal, Ecological Economics, Vol 14 No 2, 1992, pp 113-127.
14. J.J. de Felipe, Posibles escenarios futuros mundiales de emisiones y absorciones de CO₂ y cumplimiento de los acuerdos de Kyoto , Ediciones UPC - TDX, (2005).
15. IPCC, Grupo de Trabajo I; Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, La base científica; IPCC, Paris 2001

16. World Meteorological Organization; Our future climate: WMO – No 952; WMO Geneva 2003.
17. IPCC, Grupo de Trabajo II; Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, Impactos, adaptación y vulnerabilidad; IPCC, Paris 2001.
18. IPCC, Grupo de Trabajo III; Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, Mitigación; IPCC, Paris 2001
19. Energy Information Administration; Annual Energy Outlook 2003; EIA, US Department of Energy, Washington DC, 2003.
20. IPCC; Directrices del IPCC para los inventarios de gases efecto invernadero, versión revisada 1996: Libro de trabajo; IPCC, Paris 1997
21. Cielo, W. M.; Cambio climático, bosques y ordenación forestal, una visión de conjunto; Estudio FAO Montes 126, Roma 1996. Crombie, A, C, "Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo", book, Alianza Universidad, 1974.
22. <http://www.eia.doe.gov/international/>
23. http://www.fao.org/waicent/portal/statistics_es.asp