

Índice

ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	4
1. Aproximación a la investigación.....	4
TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS	9
1. Los inicios.....	9
2. La analogía orgánica	15
3. Modelos.....	18
3.1. Definiciones.....	18
3.2. Modelos para sistemas vivos	18
4. Sistemas uniformes.....	21
5. Dinámica sistémica.....	25
APLICACIONES DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS.....	30
1. Dinámica urbana.....	30
1.1. Introducción.....	30
1.2. Estructura de un área urbana	31
1.3. Escenarios	35
1.4. Análisis de sistemas complejos	42
1.4.1. Naturaleza de los sistemas complejos.....	42
1.4.2. Modelado de los sistemas complejos.....	44
1.5. Reflexiones acerca del comportamiento de la ciudad	46
1.6. Análisis de sensibilidad	48
2. Dinámica global/mundial.....	49
2.1. Extralimitación	49
2.2. Crecimiento exponencial	53
2.3. Límites: fuentes y sumideros.....	58
2.3.1. Fuentes renovables	58
2.3.2. Fuentes no renovables	62
2.3.3. Sumideros de contaminación y residuos.....	64
2.4. Modelo World3	66
2.4.1. Objetivo y estructura de World3.....	66
2.4.2. Los límites.....	67
2.4.3. Extralimitación y oscilación	70
2.4.4. Extralimitación y colapso.....	71
2.5. Tecnología y mercados.....	77
2.6. Transición hacia el equilibrio	85

SISTEMA OBRA DE CONSTRUCCIÓN	92
1. Legislación sobre sostenibilidad en la construcción. Estado de la cuestión	92
2. La obra de construcción	98
3. Descripción del sistema.....	101
3.1. Fronteras.....	101
3.2. Flujos de interacción sistema-entorno (inputs/outputs).....	104
3.2.1. Flujos de entrada.....	104
3.2.2. Flujos de salida.....	107
4. Organización y estructura interna	111
4.1. Organización del sistema	111
4.2. Estructura interna del sistema.....	113
4.2.1. Subsistemas de nivel J +1.....	113
4.2.1. Subsistemas de nivel J +2.....	114
5. Jerarquía de finalidades.....	123
CONCLUSIONES	129
GLOSARIO	131
BIBLIOGRAFÍA	135

Estructura

Estructura de la investigación

1. Aproximación a la investigación

El trabajo fin de master debe reflejar aquello que ha sido asimilado a lo largo de nuestras experiencias en el mismo y servir de motivo de reflexión, de disponer y ordenar ideas para que la investigación continúe. Aunque este proyecto ha experimentado importantes vaivenes motivados por las nuevas inquietudes surgidas en los dos años de docencia del mismo, es de esperar que con este trabajo esa indefinición desaparezca para dar paso a una línea de conocimiento fructífera que se desarrollará en futuras investigaciones.

1.1. Objetivos

Los objetivos de cualquier investigación deben ser cuantificables mediante indicadores que marquen hitos alcanzados a lo largo de la misma, tal como se observa en la figura 1. Según la jerarquía de objetivos, establecida en dicha figura, para demostrar que hemos alcanzado el máximo nivel de complejidad del sistema tendremos que definir un MODELO INFORMÁTICO DE CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN, que será el hipotético resultado final de la tesis.

El resto de hitos se irán determinando a lo largo del desarrollo de la misma.

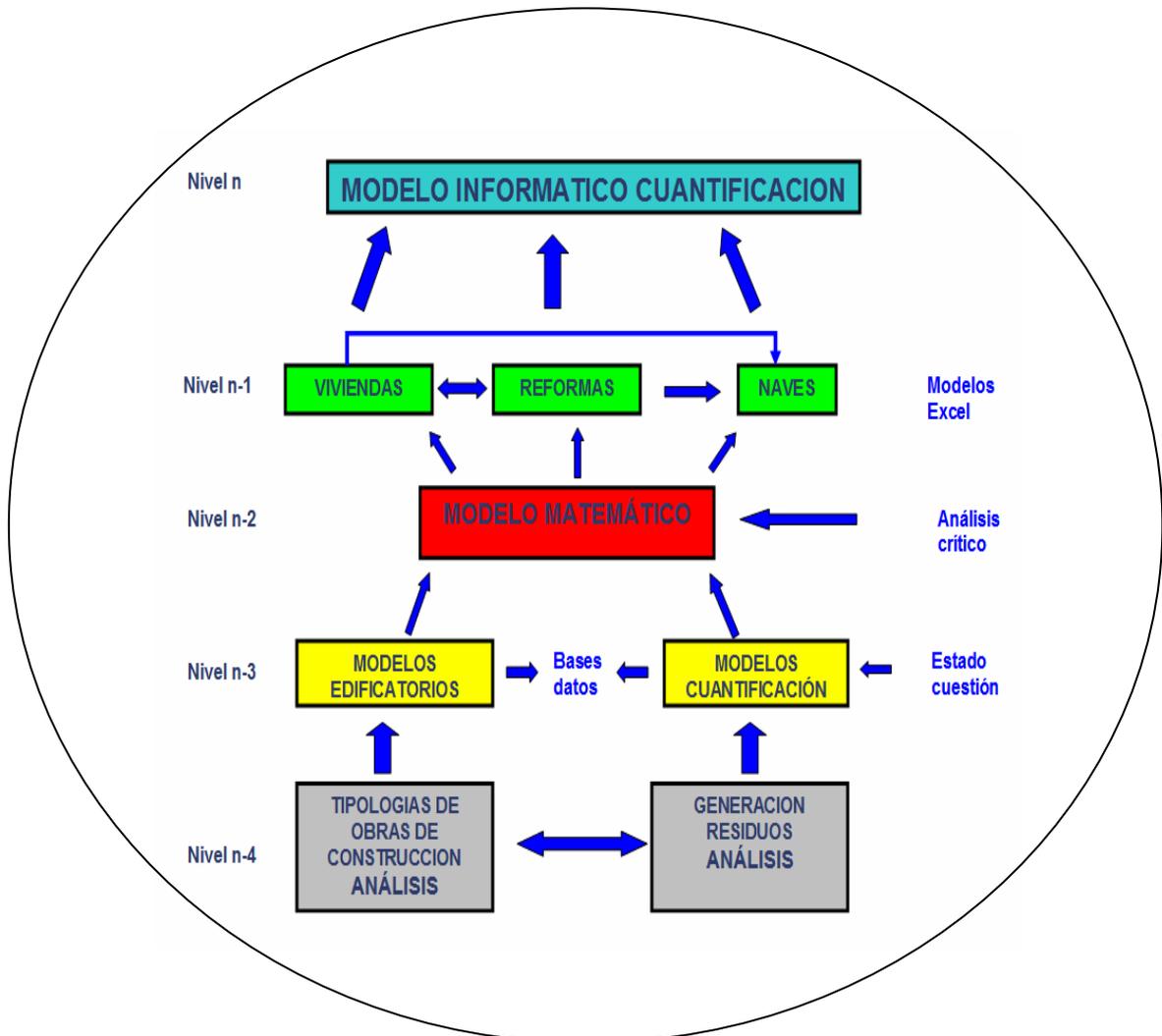


FIGURA 1. Sistema de investigación

La estructura de objetivos define el sistema sobre el que se realizará la investigación, que es a su vez un subsistema del sistema general a estudio, la obra de edificación, cuyo primer análisis se hará en el capítulo 4 de este trabajo.

Como veremos en la aproximación general a la teoría de sistemas, el sistema dependerá de lo que vive fuera de él, lo que se define en sistémica como entorno, que desde el punto de vista de la investigación se especifica de dos maneras:

1. Entorno consolidado. El análisis del estado de la cuestión referente al sistema nos permitirá definir la separación entre el sistema y el entorno, lo que se denomina fronteras del sistema. Dicho estado debería incluir (no es una lista exhaustiva):
 - Marco normativo: Código Técnico de la Edificación, Ley general de Residuos, Lista Europea de Residuos, Borrador de Real Decreto de Residuos de Construcción y

Demolición....

- Instrumentos técnicos: Banco de Costes de la Construcción...
- Agentes edificatorios
- Etc...

2. Entorno no consolidado. Gracias a su determinación, que se realizará a lo largo de la investigación, se obtendrá un marco clarificador de los componentes del sistema.



FIGURA 2. Sistema/entorno

1.2. Contenido

Teoría general de sistemas. Estado de la cuestión

Para poder analizar el sistema desde varios puntos de vista era necesario establecer como la teoría de sistemas se había introducido en el desarrollo del concepto de sostenibilidad y como dicha infiltración había dado lugar a análisis teóricos y prácticos sobre cuestiones relacionadas con el crecimiento (de los seres vivos, de las ciudades, de nuestro planeta...). Por tanto, creíamos que antes de introducir conceptos relacionados con el sistema, era necesario hacer un recorrido por la teoría de sistemas, para a la vez que se introducen los términos que servirán de base para la investigación futura, determinar en qué medida determinadas ramas de dicha teoría han sido capaces de establecer instrumentos para obtener índices de crecimiento/sostenibilidad.

La visión acerca de la teoría general incide en primer lugar sobre los inicios de la sistémica, después establece el paralelismo sistema-organismo vivo (analogía organísmica), continúa con los dos pilares de la investigación, la definición de modelo (para sistemas vivos y sistemas uniformes) y de dinámica sistémica, y finaliza con la revisión de dos aplicaciones de la dinámica de sistemas fundamentales para la determinación del estado de la cuestión en aspectos relacionados con la sostenibilidad y el crecimiento de las ciudades:

1. Dinámica urbana. Aplicación de la dinámica sistémica al crecimiento de las ciudades. Desarrollado por Jay W. Forrester en 1970.
2. Dinámica global/mundial. La dinámica sistémica aplicada a modelos mundiales.

Su estudio se concreta en dos partes: primera, a principios de los setenta, como parte del trabajo encargado por el Club de Roma, y en la que se analizaba el efecto del crecimiento de la población y de la actividad humana en un mundo de recursos limitados. De dicho estudio surge el informe "Dynamics of Growth in a finite World" (D.L.Meadows, 1972).

La segunda, desarrollada treinta años después, aspira a la determinación de similares objetivos aunque con herramientas mucho más potentes, e introduciendo conceptos y definiciones que en los años setenta aún no existían: huella ecológica, extralimitación, sostenible, colapso, ciclos de erosión.... Este último informe se recoge en el libro "Los límites del crecimiento 30 años después" (Donella Meadows, Jorgen Randers, Dennis Meadows. 2006).

Aplicación

Todas las consideraciones previas servirán de marco de referencia para analizar el sistema obra de edificación desde el punto de vista de la gestión de los residuos, ya que dichos factores, los residuos, son considerados elementos clave en los modelos de crecimiento, y por tanto, su análisis en obra permitirá plantear modelos de construcción más sostenibles. Una vez que la teoría de sistemas quede suficientemente analizada, nos introduciremos en el sistema obra para conocer cómo la gestión de los residuos influye en él. Los instrumentos normativos que están apareciendo en los últimos años, incidiendo siempre en aspectos relacionados con la sostenibilidad, obligan a buscar un modelo de obra que represente a los nuevos modelos de gestión. A la vez que se diseña el sistema, se irán conociendo esos instrumentos normativos.

Conclusiones

Se explicarán los aspectos más relevantes de la investigación y los objetivos futuros.

Glosario

Breve glosario de aquellos conceptos relacionados con la teoría general de sistemas, sostenibilidad y gestión de residuos.

Bibliografía

Teoría general de sistemas

Teoría general de sistemas

1. Los inicios

Aunque Ludwig V. Bertalanffy es considerado el padre de la teoría de sistemas, existen en la actualidad evidencias de que unas décadas antes¹, otro investigador, Bogdanov, realizó estudios que condujeron a conclusiones muy similares a las que llegó Bertalanffy .

Partiendo de esa premisa, es Bertalanffy quién define el armazón estructural de los sistemas, y es incluso quien habla de una Ciencia de los Sistemas, una Ciencia que explora y teoriza acerca de los sistemas en las distintas ciencias, una ciencia sobre la que construye una Teoría General de Sistemas que será la que defina una serie de principios aplicables a todos los sistemas.

Antes de avanzar más, es conveniente ofrecer una primera definición del concepto fundamental de SISTEMA: *modelo de naturaleza general, esto es, una representación conceptual de ciertos caracteres más bien universales de entidades observadas. Conjunto de elementos relacionados entre sí y con el medio ambiente. Los elementos del entorno del sistema se definen como aquellos que influyen o pueden ser influidos por los del sistema, pero no ambas cosas a la vez; si influyen y son influidos ya quedan dentro de la trama del propio sistema. En un sistema todo elemento está relacionado directa o indirectamente con cualquier otro.*

El concepto de sistema le permite a Bertalanffy la construcción de la Teoría, base sobre la que surgirán otras de calado similar:

- Teoría Dinámica de Sistemas: se ocupa de la variación de los sistemas con el tiempo. Imbricada con la teoría de control, que consigue, gracias a la introducción de un controlador, que un sistema pueda hacerse asintóticamente estable².
- Teoría de la información. Desarrollada por Shannon.
- Cibernética
- Teoría de los juegos
- Teoría de la decisión
- Topología ó matemáticas relacionales

La forma habitual de representar los sistemas en la Teoría General es mediante lo que se denomina la Descripción Externa, que considera al sistema una caja negra en la que las relaciones con el medio ambiente/entorno se representan gráficamente mediante diagramas de bloques y flujos y la descripción del mismo se da en términos de inputs (insumos) y outputs.

¹ La Ciencia de las Estructuras. Tektología. Conceptos introducidos por Bogdanov.

² Estabilidad: en respuesta del sistema a una perturbación, es la tendencia del mismo a volver a su estado de equilibrio.

Y las actividades que lo gobernarán serán dos:

- La comunicación: intercambio de información dentro del sistema, y entre éste y el medio ambiente
- El control: de la actividad del sistema con respecto al medio ambiente (realimentación)

En su afán totalizador, Bertalanffy incluso plantea una Filosofía de Sistemas, una reorientación del pensamiento y de la concepción del mundo según el nuevo paradigma³ científico de sistema, una visión orgánica del mundo como una gran organización en oposición al concepto mecanicista. Dentro de esta pseudoteoría, los sistemas u objetos pueden ser reales (entidades percibidas mediante la observación o inferidas de ésta, y con una existencia independiente del observador) o conceptuales (construcciones simbólicas, tales como la matemática).

En ese intento por buscar similitudes entre teorías, sistemas y modelos, Rapoport, otro pionero de la sistémica, introduce el concepto de sistemas isomorfos: *Dos sistemas matemáticos son isomorfos cuando puede establecerse una correspondencia biunívoca entre los elementos de ambos, y cuando toda relación definida entre los elementos de uno cualquiera de ellos también se cumple entre los elementos correspondientes del otro. Dos sistemas son isomorfos si ambos pueden representarse por medio del mismo modelo matemático.*

Algunos isomorfismos matemáticos conocidos:

- La curva de crecimiento exponencial en el tiempo y el crecimiento de una especie animal
- El modelo de crecimiento relativo⁴ : para sistemas de diferenciación social, de procesos de urbanización
- Modelos de competencia: dinámica de poblaciones (Volterra), carrera armamentística...

³ Paradigma (Thomas Kuhn): Conjunto de realizaciones científicas universalmente reconocidas y que durante un cierto tiempo proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica (grupo científico que desarrolla su actividad en torno a un determinado paradigma).

⁴ Morfogénesis: se realiza en parte merced al crecimiento relativo. Diferentes ritmos de crecimiento de variados órganos, consecuencia de la competencia entre tales componentes por los recursos disponibles en el organismo.

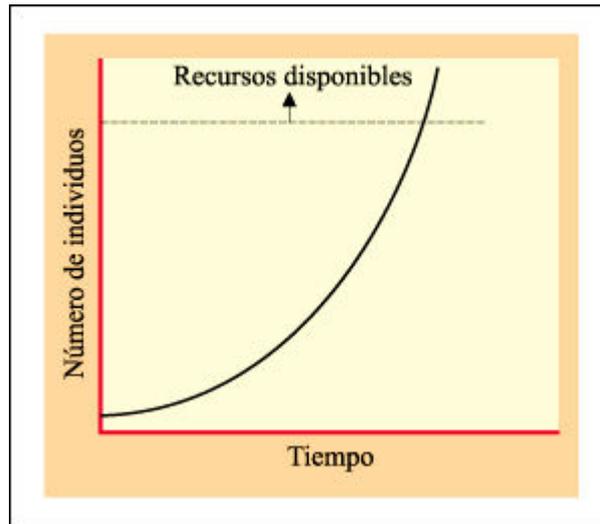


FIGURA 3. Curva de crecimiento exponencial de población

La Teoría General ha defendido siempre una visión holística⁵ del mundo, una visión global e integral, frente a la mecanicista u atomista, donde lo local y diferencial definía cada modelo de sistema.

En ese marco Rapoport enuncia el principio de equifinalidad para sistemas abiertos, aplicable entre otros, a los organismos vivos, que se mantienen en continua incorporación y eliminación de materia, en un estado llamado uniforme (**steady**), que es la esencia del metabolismo.

Dicho principio se define como la tendencia de este tipo de sistemas (los abiertos) a alcanzar un estado final de manera relativamente independiente de las condiciones iniciales y por distintos caminos, y que permite a este tipo de sistemas, y entre ellos los sistemas vivos, resistirse a las perturbaciones que los alejan de algún estado estable⁶ o uniforme de orden y organización crecientes.

La Teoría General de Sistemas (TGS) se fue enriqueciendo a lo largo de los años con las aportaciones de otros científicos, como las realizadas por John Milsum. Entre sus aportaciones se encuentra la definición de una estructura de relaciones jerárquicas entre los sistemas vivos, que se muestra de forma sintética:

- Humana
- Intracelular (sistema homeostático global)
- De la administración
- Movilidad en la jerarquía

⁵ Visión holística: ver el objeto como un todo funcional y entender consecuentemente la interdependencia de las partes. La visión ecológica además tendría en cuenta cómo se inserta el objeto/sistema en el entorno natural y social. Emparentada también con la psicología Gestalt (forma orgánica), en la que el todo es más que la suma de las partes.

⁶ Homeostasis (Cannon): conjunto de funciones que permite mantener todo un conjunto de factores del medio interno entre unos intervalos que se consideran constantes, a pesar de las posibles variaciones del medio externo.

- Jerarquía experiencial
- Jerarquía trófica
- Jerarquías entrelazadas

Milsum también introdujo la idea del crecimiento como un proceso isomórfico (representable mediante gráfica de crecimiento) y realimentado positivamente⁷, planteando igualmente un modelo vital isomórfico asociado al proceso de crecimiento, decadencia y de ciclos de realimentación aplicado a entidades como ciudades⁸, sociedades o poblaciones.

Él afirmaba que las distintas jerarquías de las sociedades humanas están caracterizadas por procesos de crecimiento-decadencia amplios, lo que entroncaba con las hipótesis de Mesarovic, el cual, partiendo del concepto de sistemas jerarquizados establecía el estudio de sistemas complejos mediante su descomposición en subsistemas convenientemente interrelacionados (descomposición por estratos).

Otros pioneros de la sistémica son Weinberg y Orchard. El primero introduce los espacios de estados y los grafos cronológicos (representación de las variables del espacio de estados frente al tiempo), mientras que el segundo incorpora al lenguaje sistémico algunos conceptos fundamentales para los sistemas que serán de utilidad a la investigación, tales como:

- El nivel de resolución espacio/tiempo, que representa la precisión y frecuencia con la registramos las cantidades elegidas.
- La matriz de actividad, que engloba la variación en el tiempo de las cantidades.
- Las relaciones invariantes en el tiempo entre cantidades.
- La definición de comportamiento de un sistema, que podrá ser permanente, relativamente permanente y temporal.
- La estructura, que Orchard define como la parte de la organización del sistema que se mantiene constante.
- El estado del sistema, que se define como el conjunto de los valores instantáneos de todas las cantidades del sistema.

⁷ Dinámica de realimentación positiva, retroalimentación autorreforzadora o círculo vicioso.

⁸ Jay W. Forrester en su libro *Urban Dynamics* modela la ciudad con un período de crecimiento hasta la madurez de aproximadamente 200 años, para comenzar el declive a continuación, a no ser que exista algún nuevo estímulo de crecimiento.

Para acabar con este capítulo tenemos que hablar de la rama de la sistémica denominada Cibernética⁹, impulsada por Robert Wiener en las fundacionales Conferencias de Macy¹⁰ y que se cimenta en los conceptos de información y realimentación.

Existe el error frecuente de identificar la cibernética con la teoría de control, cuando en realidad los sistemas cibernéticos son un caso especial de los sistemas que exhiben autorregulación, que únicamente podrán ser sistemas abiertos desde el punto de vista termodinámico, ya que evolucionan hacia estados de creciente complejidad (entropía decreciente).



FIGURA 4. La ciudad cibernética. Jacques Fresco.

La cibernética también analiza en profundidad el concepto de máquina. Así, William Ross Ashby (1903-1972), médico y neurólogo inglés, plantea que para poder regular o controlar una máquina, es necesario un proceso de acoplamiento, es decir, que tiene que existir una máquina controladora que determine el cambio en el sistema máquina, lo que implicaría que los verdaderos sistemas autorregulados deberían ser sistemas vivientes.

⁹ Del griego Kiber (golpe de timón): Corrección del curso de la nave como respuesta a una perturbación detectada por el mecanismo de control

¹⁰ En dichas conferencias, denominadas también conferencias cibernéticas, intervinieron otros científicos relevantes: Bateson, pionero en la aplicación del pensamiento sistémico a la terapia de familia. Desarrolló un modelo cibernético del alcoholismo y fue el autor de la teoría del callejón sin salida para la esquizofrenia. ; Von Neumann, que desarrolló los modelos informáticos de cognición. La idea básica del modelo informático de actividad mental era que el proceso de conocimiento puede definirse como procesamiento de datos. El campo de la inteligencia artificial se desarrolló como consecuencia directa de esta visión, aunque recientes progresos han dejado claro que la inteligencia humana es radicalmente distinta a la de las máquinas o inteligencia artificial.

Sin embargo, en sistemas no vivientes podemos encontrar procesos que de alguna manera se denominan autorregulados.

Por ejemplo, Adam Smith hablaba de la mano invisible reguladora del mercado, aquella que mantenía a los mercados funcionando de manera más eficiente cuando había igualdad entre compradores y vendedores y cuando ni el comprador ni el vendedor eran lo bastante grandes para influir en el precio del mercado. Una visión de mercado compuesto por empresas pequeñas gestionadas por el propietario y situadas en las comunidades donde estos residen, muy distinto de la economía globalizada actual.

O la Constitución de los E.E.U.U., que cita los conceptos de frenos y equilibrios para dar a entender que existen sistemas políticos retroalimentados.

Más allá de estas metáforas cibernéticas, los sistemas en los que se basan las máquinas actuales son esencialmente cibernéticos, generalmente abiertos a la información y generalmente cerrados con respecto a la transferencia de entropía.

Como resumen de toda esta introducción a la TGS, podemos decir que dicha teoría formula una serie de principios válidos para sistemas en general, sea cual sea la naturaleza de sus componentes y las relaciones o fuerzas reinantes entre ellos.

Es decir, es una ciencia general de la totalidad, con una concepción organísmica/organicista de los objetos opuesta frontalmente a la mecanicista (los fenómenos físicos explican la realidad) y biológica (los fenómenos biológicos explican la realidad) que se habían impuesto en los siglos anteriores.

Una TGS sustentada en conceptos como isoformismo, homología¹¹, equifinalidad o realimentación.

¹¹ Difieren los factores eficientes, pero las leyes respectivas son formalmente idénticas

2. La analogía organísmica

Ya en el año 1959 Anatol Rapoport hablaba de considerar una organización real como un organismo, ya que en las organizaciones son demostrables funciones cuasibiológicas. Las organizaciones se mantienen, a veces se reproducen o metastatizan, responden a tensiones, envejecen y mueren. Las organizaciones tienen anatomías discernibles, y cuando menos las que transforman insumos materiales (como las industrias) tienen fisiologías¹².

Por eso queremos hacer aquí un breve estado de la cuestión de aquellas investigaciones que han pretendido analizar los organismos vivos como sistemas con una determinada complejidad, para poder hacer analogías con sistemas no vivientes que analicemos posteriormente.

Si consideramos el organismo como un sistema físico, en él se dan sistemas en equilibrio, pero el organismo no puede considerarse como un sistema en equilibrio. El organismo es un sistema **abierto** (importación y exportación de materia).

Un sistema químico abierto se define por:

- Puede alcanzar un estado uniforme independiente del tiempo, en el cual el sistema persista constante en conjunto y en sus fases (macroscópicas) aunque haya un flujo continuo de materias componentes.
- Dicho estado no es reversible ni en conjunto ni en muchas reacciones.

En oposición, los sistemas cerrados se caracterizan por:

- Los equilibrios, basados en reacciones reversibles, y definidos por máxima entropía y mínima energía libre.

Por analogía con los sistemas físicos y químicos, los organismos vivos no son sistemas cerrados en verdadero equilibrio, sino sistemas abiertos en estado uniforme.

Según este modelo de sistema abierto, en un ser vivo hay innumerables procesos químicos y físicos "ordenados" de tal manera que permiten al ser vivo persistir, crecer, desarrollarse, reproducirse. En determinadas condiciones, los sistemas abiertos se aproximan a un estado independiente del tiempo, el llamado estado uniforme, que se mantiene separado del equilibrio verdadero para estar en condiciones de realizar trabajo.

En dicho estado el sistema permanece constante en composición, pese a continuos procesos irreversibles, importación y exportación, constitución y degradación, presentando, por tanto, notables características de regulación, evidentes en particular por el lado de la equifinalidad.

La analogía organísmica tiene muchos puntos de contacto con la visión ecológica¹³ del mundo, la cual defiende que existen tres tipos de seres vivos multicelulares: organismos, sociedades y ecosistemas.

Arthur Tansley, biólogo inglés (1871-1955), definió el ecosistema como una comunidad de organismos y su entorno físico, interactuando como una unidad ecológica.

Los tres tipos de seres vivos se diferencian en el grado de autonomía de sus componentes. Así, en los

¹²Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones/ L.von Bertalanffy.

¹³ Ecología: del griego oikos (casa). Es el estudio del Hogar Tierra. Emerge de la escuela organicista de biología del XIX, cuando los biólogos comienzan a estudiar comunidades de organismos

organismos, los componentes celulares tienen un grado animal de existencia independiente, mientras que los miembros de las sociedades humanas, los seres humanos, tienen un grado máximo de autonomía, disfrutando de múltiples dimensiones de existencia independiente, mientras que las sociedades animales y los ecosistemas ocupan espacios diversos entre estos dos extremos.

Si analizamos el caso del organismo vivo más pequeño, la célula vegetal, su estructura se compone de :

- Un centro de producción que son los ribosomas (compuesto de ARN)
- Un centro de *reciclaje* (lisosoma).
- La membrana celular, que admite alimentos y expulsa residuos.
- Una central de producción de energía (mitocondria)
- Una estación solar (cloroplasto)

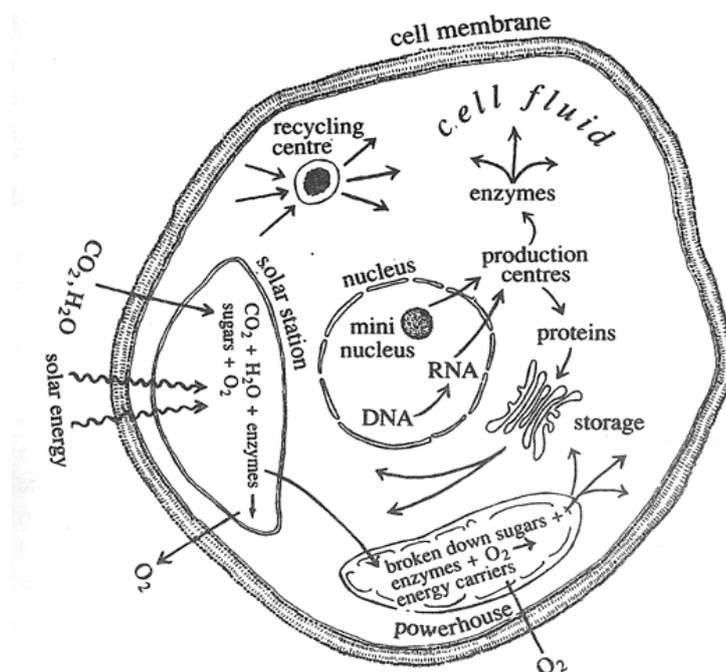


FIGURA 5. Procesos metabólicos en una célula vegetal

Lo que nos permite observar las similitudes entre las teorías ecológicas y las organísmicas. Así, por ejemplo, ambas consideran un principio clave el reciclaje.

Atendiendo a la visión ecológica, todos los organismos de un ecosistema producen residuos (ya que se consideran sistemas abiertos), pero lo que es desperdicio para una especie es alimento para otra, de modo que los residuos son continuamente reciclados y el ecosistema como un todo no produce generalmente desperdicios.

El único residuo generado por el ecosistema como un todo es la energía térmica desprendida en la respiración, que es irradiada a la atmósfera y realimentada constantemente por el sol a través de la

fotosíntesis.

Volviendo al análisis de la analogía, aunque fue enunciada en los años 50, llegada la década de los 70 no había aparecido aún ninguna teoría formal de sistemas que se hubiera empleado en ningún campo, y por tanto, no existía aplicación práctica del modelo organicista.

El principal motivo de este fracaso era debido a la ausencia de técnicas matemáticas para tratar la complejidad de los sistemas vivos. Aunque se podía demostrar en aquella época que en los sistemas abiertos las interacciones simultáneas de varias variables generaban los patrones característicos de la vida, sin embargo no se disponía de los medios suficientes para describir matemáticamente estos patrones.

A lo largo de la década de los 80 aparecen con éxito una serie de modelos sistémicos que describen varios aspectos del fenómeno de la vida, que analizaremos en el siguiente subcapítulo. Desde dichos modelos ha aparecido unida al lenguaje matemático adecuado una teoría coherente de los sistemas vivos.

El lenguaje matemático es lo que se denomina matemática de la complejidad, y la teoría de los sistemas que la describe se denomina **Autoorganización**.

La autoorganización o autopoiesis¹⁴ plantea la existencia de una organización común a todos los seres vivos, la idea del patrón de organización. En los seres vivos, ese patrón es en forma de red. Una red de procesos de producción, en la que la función de cada componente es participar en la producción o transformación de otros componentes de la red. Lógicamente las relaciones en un patrón en forma de red son no lineales, se traducen físicamente en bucles de retroalimentación, y se describen matemáticamente en términos de ecuaciones no lineales.

Los modelos de autoorganización se refieren a sistemas abiertos operando lejos del equilibrio, tal como se había mencionado anteriormente, en los que es necesario un flujo constante de materia y energía a través del sistema para que tenga lugar la autoorganización.

¹⁴ Maturana y Varela. La trama de la vida. Fritjof Capra. Barcelona Anagrama 1996

3. Modelos

3.1. Definiciones

Hemos analizado de forma resumida los aspectos principales de la TGS, la analogía orgánica para los seres vivos y hemos comenzado a introducir el concepto de modelo para poder conocer cómo se comportan los organismos.

Es precisamente ahora cuando debemos entender cómo se representa el modelado en la TGS y de qué forma nos puede servir en nuestras investigaciones posteriores.

Una primera definición de modelo podría ser ésta: *representación de un determinado aspecto de la realidad en un lenguaje específico. Un objeto M es un modelo de X para un observador O si O puede emplear M para responder a cuestiones que le interesan acerca de X. M: representante; X: lo representado*¹⁵.

Donde la relación que liga a la realidad modelada X con su modelo M se denomina relación de modelado, y las propiedades específicas del sistema real X se codifican en propiedades correspondientes del sistema formal M.

En el caso de modelos de comportamiento dinámico, se trata de conseguir que la evolución que experimentan en el tiempo las magnitudes del modelo reproduzcan, imiten o simulen las del sistema real que se está estudiando.

3.2. Modelos para sistemas vivos

Para el caso del modelado de sistemas vivos, emplearemos lo que se denomina en sistémica la Matemática de la complejidad, aunque también se define como teoría de los sistemas dinámicos.

Aunque analizaremos posteriormente las características de la dinámica sistémica, ahora introduciremos aquellos modelos relacionados con la dinámica que nos sirven para por una parte, conocer la estructura de los sistemas dinámicos, y por otra, para profundizar en su aparato matemático, siempre aplicándolo a sistemas vivientes en evolución.

Estas nuevas matemáticas son de relaciones y patrones, es decir, cualitativas. Pasamos de objetos a relaciones, de cantidad a cualidad, de sustancia a patrón.

El camino hasta alcanzar esta complejidad sería partir de la ciencia clásica de Galileo, avanzar por el sendero de las ecuaciones diferenciales lineales de Newton y Leibnitz, subir las montañas de Maxwell y Boltzmann¹⁶ hasta alcanzar el pico de las ecuaciones diferenciales no lineales (complejidad máxima).

Es evidente que en estos sistemas no lineales aparecen frecuentes procesos de retroalimentación autorreforzadora.

Algunos de los modelos que se emplearon para la representación de los sistemas vivos y que

¹⁵ Máquinas, sistemas y modelos: un ensayo sobre sistemas. Javier Aracil. Editorial Tecnos. Madrid, 1986.

¹⁶ Maxwell: interpretación probabilística del concepto de entropía. Boltzmann: teoría cinética de los gases (relación ley dinámica-descripción estadística). Son ecuaciones lineales estadístico-probabilísticas.

pertenecen al ámbito de la dinámica sistémica son:

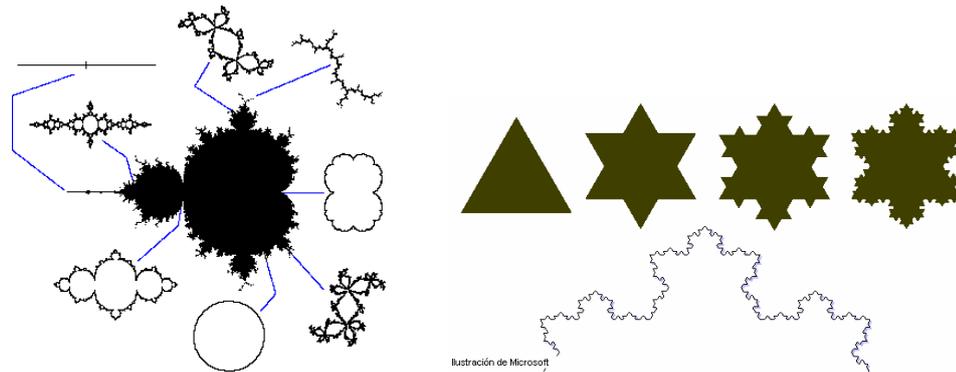
- **Poincaré y las huellas del caos:** Recuperó para las matemáticas las metáforas visuales. Es una matemática de patrones y relaciones conocida como topología. Es una geometría en la que todas las longitudes, ángulos y áreas pueden ser distorsionadas a voluntad. Representa las matemáticas de las relaciones, de los patrones inmutables o invariantes. Las técnicas matemáticas que han permitido a los investigadores el descubrimiento de patrones ordenados en sistemas caóticos se basan en el enfoque de Poincaré y están íntimamente ligados al desarrollo de los ordenadores. Generalmente las soluciones de las ecuaciones no lineales que hay que resolver se trazan en forma de curva o conjunto de curvas en un gráfico.
- **Atractores extraños:** Existen 3 modelos de atractores: puntuales, correspondientes a sistemas dirigidos hacia un equilibrio estable, periódicos, correspondientes a oscilaciones periódicas, y los llamados atractores extraños, correspondientes a sistemas caóticos. Un ejemplo típico de un sistema de este tipo es el del péndulo caótico (Ueda). El comportamiento caótico es determinista y pautado y los atractores extraños ayudan a transformar los datos aparentemente aleatorios en claras formas visibles. Un sistema no lineal puede tener varios atractores que podrán ser de distinto tipo: caóticos o extraños y no caóticos.



FIGURA 6. Atractor de Ueda

- **El efecto mariposa** (Edward Lorenz): cualquier sistema físico con comportamiento no periódico resulta impredecible. Su publicación en 1963 marcó el inicio de la teoría del caos, y el atractor del modelo (atractor de Lorenz) se convirtió en el más popular y ampliamente estudiado. El análisis cualitativo de un sistema no lineal consiste en identificar los atractores y cuencas de atracción del sistema y clasificarlos según sus características topológicas. El resultado es un dibujo dinámico del sistema completo llamado el retrato fase.
- **Puntos de bifurcación:** marcan cambios súbitos en el retrato fase del sistema. Físicamente se corresponden con puntos de inestabilidad en los que el sistema cambia abruptamente y aparecen de repente nuevas formas de orden. Como demostró Ilya Prigogine tales inestabilidades sólo se pueden dar en sistemas abiertos operando lejos del equilibrio.
- **Geometría fractal** (Benoit Mandelbrot): Inventó un nuevo tipo de matemáticas que tuvo una tremenda influencia en la nueva generación de matemáticas que estaba desarrollando la teoría del caos y otras ramas de la Teoría de sistemas dinámicos.
Creó la geometría fractal para describir y analizar la complejidad del mundo natural que nos rodea. La propiedad más sorprendente de estas formas fractales es que sus patrones característicos se encuentran repetidamente en escalas descendentes, de modo que sus partes, en cualquier escala, son semejantes en forma al conjunto. Ejemplos: delta de un río, el ramaje de un árbol, las ramificaciones de los vasos sanguíneos....

Los atractores extraños son ejemplos de fractales. Si se amplían fragmentos de su estructura, revelan una subestructura multinivel en la que los mismos patrones se repiten una y otra vez. Un ejemplo sería la Curva Koch (copo nieve). Muchas imágenes fractales pueden generarse matemáticamente por procesos iterativos en el plano complejo. Además en las nuevas matemáticas de la complejidad, ecuaciones sencillas pueden generar atractores extraños enormemente complejos y reglas sencillas de iteración dan lugar a estructuras más complicadas que lo que podríamos imaginar jamás.



FIGURAS 7-8. Geometría fractal

4. Sistemas uniformes

El concepto de sistemas uniformes ya se ha mencionado de pasada en puntos anteriores, pero conviene retomarlo para que se clarifique los significados de sistemas en equilibrio y sistemas uniformes.

Para ello, nos valdremos de la teoría de **estructuras disipativas** de Ilya Prigogine¹⁷.

En Termodinámica clásica, la disipación de energía en transferencia de calor, fricción y demás se asociaba siempre con pérdida. El concepto de estructuras disipativas introdujo un cambio radical en esta visión, demostrando que en los sistemas abiertos la disipación es una fuente de orden.

Según esta teoría, las estructuras disipativas no solo se mantienen en un estado estable lejos del equilibrio, sino que pueden incluso evolucionar.

Esa evolución se desencadena cuando el flujo de materia y energía a través de las estructuras aumenta, pasando por nuevas inestabilidades y transformándose en nuevas estructuras de incrementada complejidad. Mientras las estructuras disipativas reciben su energía del exterior, las inestabilidades y saltos a nuevas formas de organización son el resultado de fluctuaciones internas, amplificadas por bucles de realimentación positivos.

En todo sistema abierto se está continuamente procesando materia y energía del exterior, de modo que esa inyección puede separar al sistema de las condiciones de equilibrio termodinámico, creando otras en las que emerge una estructura disipativa.



FIGURA 9. Estructuras disipativas. La ciudad de vino. Frank Gehry

¹⁷ Ilya Prigogine (1917-2003). Físico y químico ruso, galardonado con el Nobel de Química en 1977. Especialista en termodinámica, realizó investigaciones teóricas sobre la expansión de la termodinámica clásica en el estudio de los procesos irreversibles con la teoría de las estructuras disipativas.

Analizados los sistemas uniformes, a continuación se describen sistemas vivos donde aparecen estructuras disipativas.

Ya en los años 70, el científico Manfred Eigen introdujo el concepto de **Hyperciclos**, proponiendo que el origen de la vida sobre la Tierra podría ser el resultado de un proceso de organización progresiva en sistemas químicos alejados del equilibrio, involucrando hyperciclos de bucles de realimentación múltiples (autoorganización molecular).

Los sistemas de reacciones especiales estudiados por Eigen son conocidos como ciclos catalíticos y son el centro de los sistemas químicos autoorganizadores.

Los hyperciclos resultan ser no solo notablemente estables, sino capaces de autorreproducirse exactamente y de corregir errores de reproducción, lo que significa que pueden conservar y transmitir información compleja. Esta autorreplicación puede haber ocurrido en sistemas químicos antes de que apareciera la vida, por lo que estos hyperciclos serían pues precursores de los sistemas vivos¹⁸.

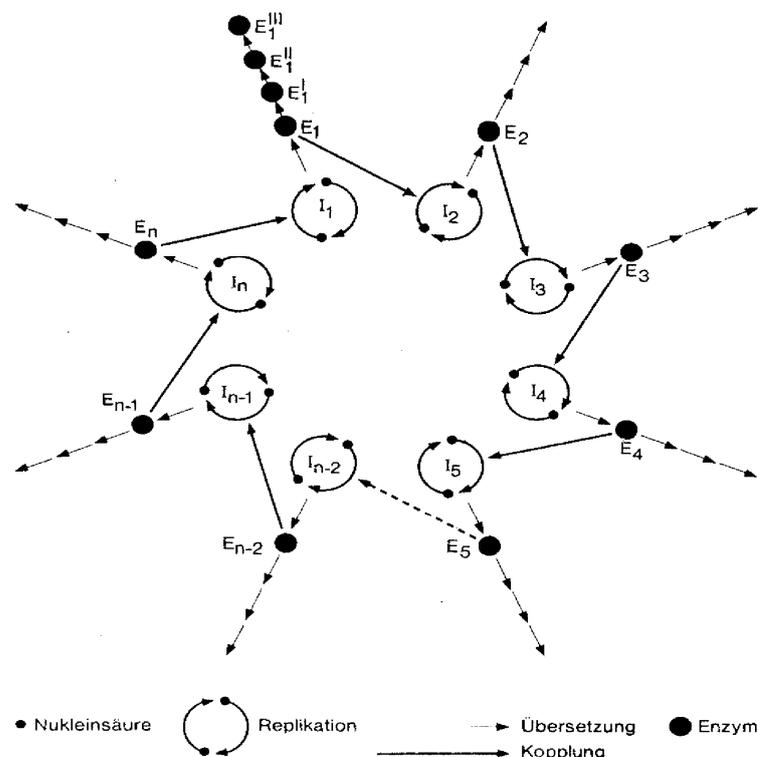


FIGURA 10. Hyperciclos. El origen de la vida

También la teoría **Gaia**¹⁹ es una secuela de las estructuras disipativas. En ella se afirma que el planeta Tierra es un sistema autoorganizador vivo.

Para poder llegar a esa conclusión, los investigadores buscaron la característica de vida más general

¹⁸ Los principales componentes de todo organismo vivo son C,H,O,N,S,P, que no se combinan aleatoriamente, sino de modo ordenado y pautado. El medioambiente de la Tierra primitiva favorecía la formación de moléculas complejas, algunas de las cuales se convirtieron en catalizadores de diversas reacciones químicas. De ahí a los hyperciclos y de ahí al estado prebiótico.

¹⁹ Gaia, la Tierra Viva. La teoría fue ideada por el químico James Lovelock en 1969 (aunque publicada en 1979) siendo apoyada y extendida por la bióloga Lynn Margulis

que se pudiera encontrar, y se concluyó que era que los organismos vivos toman materia y energía y expulsan desechos.

Lovelock reconoció la atmósfera terrestre como un sistema abierto lejos del estado de equilibrio, caracterizado por un flujo constante de materia y energía, cuyo proceso de autorregulación, consistente en la regulación de la temperatura del planeta y de la composición de la atmósfera, es la clave del sistema.

La teoría Gaia demuestra que existe una íntima relación entre las partes vivas del planeta (plantas, microorganismos, animales) y las no vivas (rocas, océanos y atmósfera).

Si observamos el ciclo del CO_2 , el exceso del mismo en la atmósfera es absorbido y reciclado en un extenso bucle de realimentación que incluye la erosión de las rocas como elemento clave.

Ese ciclo completo (que vincula volcanes, erosión de rocas, bacterias del suelo, algas oceánicas, sedimentos de caliza y de nuevo volcanes) actúa como un gigantesco bucle de realimentación que contribuye a la regulación de la temperatura de la Tierra.

Igualmente la hipótesis Gaia plantea que la superficie de la Tierra, que siempre hemos considerado como el entorno de la vida, es en realidad, parte de ésta, por que el manto de aire (la troposfera) debe ser considerado como un sistema circulatorio, producido y mantenido por la vida del planeta.



FIGURA 11. Gaia, la diosa griega de la Tierra

Siguiendo el análisis de sistemas uniformes, hemos alcanzado la estructura de máxima complejidad dentro de los seres vivos, que sería la del planeta Tierra.

Según las teorías de autoorganización de Maturana y Varela, los criterios para distinguir el comportamiento de un ser vivo serían:

1. El patrón de organización, definido por la configuración de las relaciones que determinan las características esenciales del sistema. Para los sistemas vivos el patrón será la autopoiesis u autoorganización.

2. La estructura, que representa la corporeización física del patrón de organización del sistema, y que en el caso de los sistemas vivos se define mediante el concepto de estructuras disipativas.
3. El proceso vital, que se define como la actividad involucrada en la continua corporeización física del patrón de organización del sistema (concepto de cognición).

Conforme a las teorías comentadas anteriormente, se puede afirmar que un sistema vivo es a la vez abierto y cerrado. Abierto desde el punto de vista de la estructura, pero cerrado organizativamente.

La materia y la energía fluyen a través de él, pero el sistema mantiene una forma estable y lo hace de manera autónoma, a través de su autoorganización.

La autopoiesis, el patrón de vida, es un conjunto de relaciones entre procesos de producción, y una estructura disipativa sólo puede ser entendida en términos de procesos metabólicos y de desarrollo.

En la teoría emergente de los seres vivos, los procesos vitales son identificados con la cognición, el proceso de conocer. La mente no es una cosa, sino un proceso, el proceso mismo de la vida.

Por tanto, en la nueva ciencia de la complejidad (que se inspira en la trama de la vida) aprendemos que el no-equilibrio es una fuente de orden.

En los sistemas vivos, el orden emergente del no-equilibrio resulta mucho más evidente. A través del mundo viviente, el caos es transformado en orden.

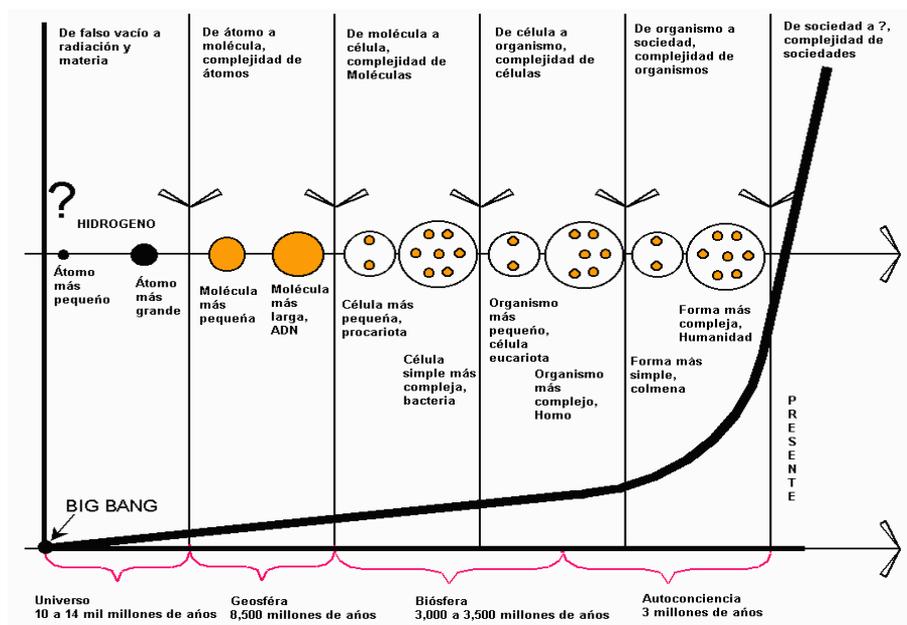


FIGURA 12. Evolución de la Complejidad. Adaptado de STIKKER, Allerd The Transformation Factor. Towards an Ecological Consciousness. Element Inc. Rockport MA USA 1992

5. Dinámica sistémica

La dinámica sistémica permite construir modelos de comportamiento de sistemas reales pertenecientes a ámbitos en los que no existen leyes básicas que permiten establecer la estructura causal del modelo, sino que, por el contrario, lo que se conoce es el modo de comportamiento de la realidad, y se trata, analizando la estructura de esa realidad, de construir un modelo que reproduzca ese comportamiento.

Para el análisis de la estructura se emplea todo tipo de información que se tenga respecto de la realidad modelada, lo que puede incluir formas de conocimiento que no han alcanzado todavía el grado de aceptación universal que les confiere el carácter de científico, pero que, en todo caso, representan la mejor información de la que se dispone en un momento determinado.

La dinámica de sistemas trata de conseguir que la evolución que experimentan en el tiempo las magnitudes del modelo reproduzcan o simulen las del sistema real que se está estudiando.

El investigador Jay W. Forrester²⁰ es considerado el padre de la dinámica sistémica. Según su análisis teórico, para construir un modelo que represente dinámicamente a un sistema X deberíamos dar los siguientes pasos:

1. Identificación de variables
2. Establecer hipótesis relativas entre variables (soporte sistémico). Esta trama se representa mediante grafo (diagrama causal o de influencias).
3. Introducir simplificaciones para representar matemáticamente las relaciones involucradas en el modelo
4. Resolver las ecuaciones matemáticas (mediante computadores).
5. Resultados. Son recomendaciones plausibles, no predicciones

²⁰ Jay Wright Forrester (n. 1918) es considerado el padre de la Dinámica de sistemas. Nació en 1918 en Nebraska, EEUU, y después de haber obtenido el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Nebraska, continuó sus estudios en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachussets, Massachusetts Institute of Technology).

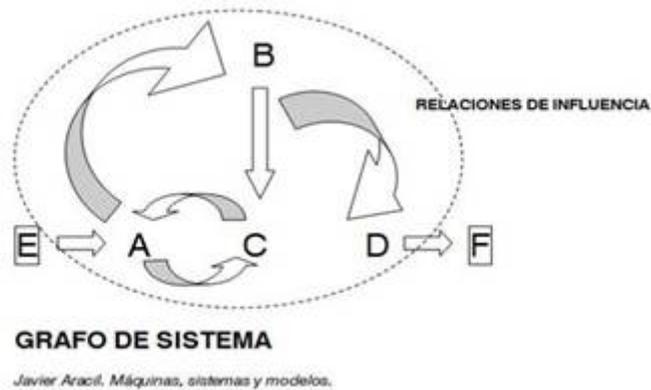


FIGURA 13. Grafo o diagrama de influencias

Según la dinámica de sistemas, el sistema tiene siempre la siguiente morfología:

- Composición C (variables endógenas). Las variables endógenas caracterizan los elementos cuyo comportamiento está completamente determinado por la estructura del sistema.
- Entorno E (variables exógenas). Las variables exógenas describen los fenómenos que actúan sobre el sistema, que son susceptibles de ser modificados desde su exterior.
- Estructura S

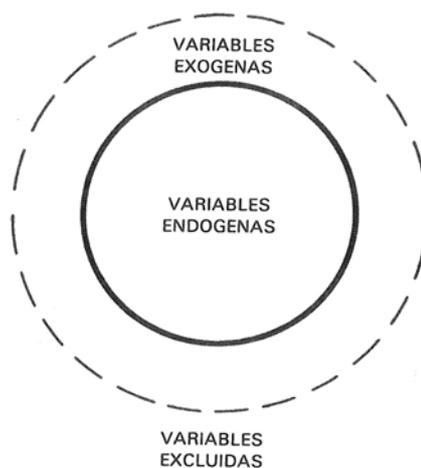


FIGURA 14. Variables

Por último, una vez definidas las relaciones de las variables mediante el grafo o diagrama causal o de influencias, se construye el **diagrama de Forrester**.

Dicho diagrama asocia al diagrama de influencias una estructura funcional, clasificando las distintas variables que forman el diagrama causal de acuerdo con la función que desempeñan en orden a generar el comportamiento dinámico del sistema.

Existen 3 tipos de variables:

- **Variables de estado o nivel:** constituyen aquel conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema. Representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado. Esta función se asimila al nivel alcanzado por un líquido en un depósito, de donde proviene precisamente la denominación de variable de nivel. Las variables de estado cambian lentamente en respuesta a las variaciones de otras variables.
- **Variables de flujo:** representan la variación de una variable de estado. Determinan las variaciones de los valores de las variables de estado del sistema. Caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en las correspondientes variables de estado. Las variables de flujo determinan cómo se convierte la información disponible en una acción o actuación.
- **Variables auxiliares:** pasos o etapas en que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por las variables de estado.

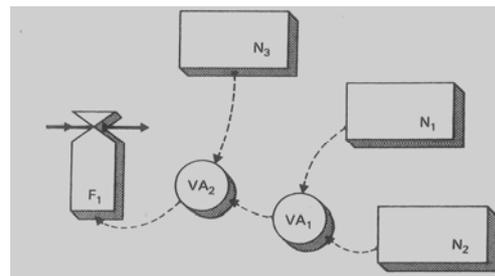
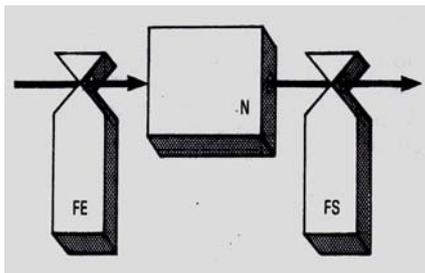


FIGURA 15. Variables de flujo y de estado FIGURA 16. Relaciones entre variables

Una vez construido el modelo debe ser analizado con el fin de establecer su validez (análisis de sensibilidad). Es decir, en qué medida influyen las modificaciones de los valores numéricos de los parámetros en las conclusiones que se extraen del modelo.

También se puede realizar un análisis cualitativo del modelo: atractores, cuencas de atracción, perturbaciones....

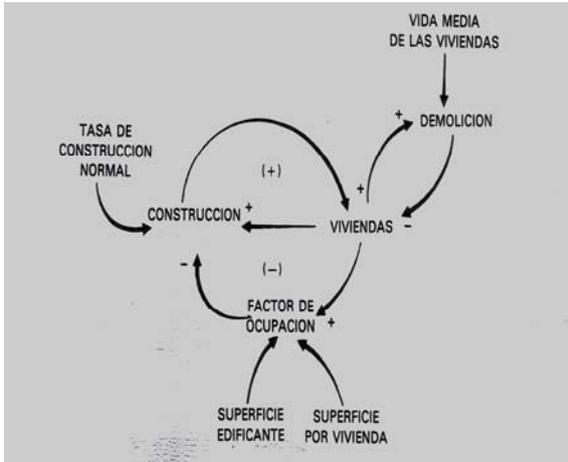


FIGURA 17

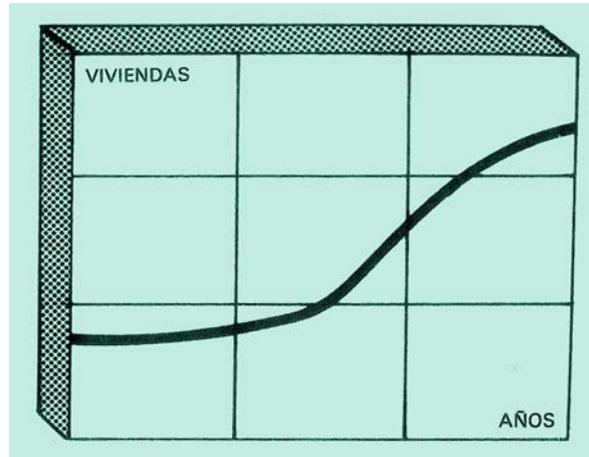


FIGURA 18

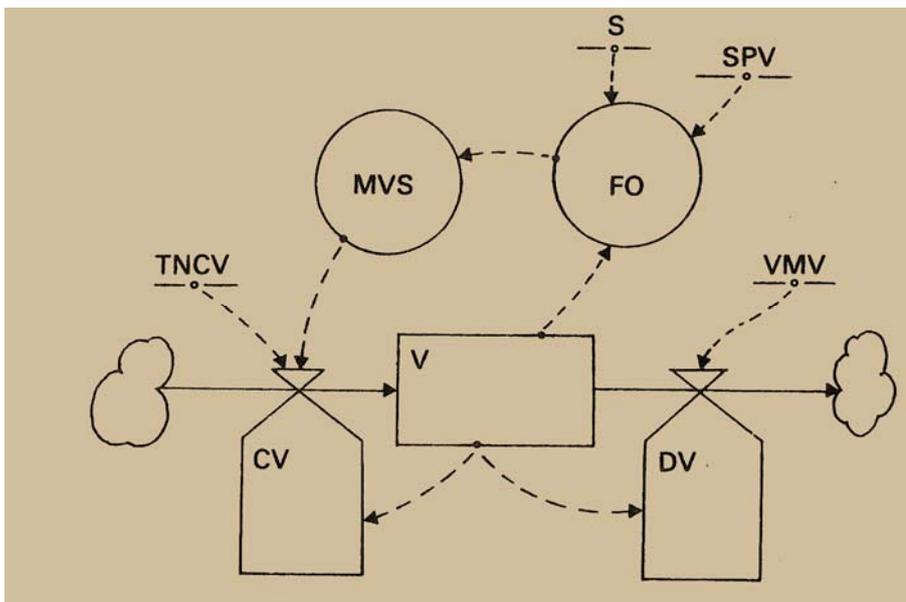


FIGURA 19

Ejemplo de dinámica sistémica: MODELO DE EVOLUCIÓN DE VIVIENDAS: Diagrama de influencias (figura 17), gráfica (fig.18) y diagrama de Forrester (fig.19).

Aplicaciones de la dinámica de sistemas

Aplicaciones de la dinámica de sistemas

1. Dinámica urbana

1.1. Introducción

Como comentamos anteriormente, Jay W. Forrester es un ingeniero americano del Instituto Tecnológico de Massachussets que puso en marcha toda la teoría dinámica de sistemas durante los años 60. A él se le debe la estructura de la dinámica sistémica, y los diagramas que sirven para establecer las relaciones entre las variables del sistema llevan su nombre.

A Forrester se le conoce principalmente por haber diseñado un modelo para conocer el comportamiento global del mundo desde el punto de vista del crecimiento, pero también a finales de los 60, como consecuencia de sus investigaciones previas diseña un modelo para el crecimiento de las ciudades, la dinámica de las ciudades o dinámica urbana.

Para Forrester, su modelo de ciudad americana de los 70 consistía en un sistema de industrias interactuando con viviendas y personas.

En condiciones favorables, esa interrelación generaba desarrollo. Si el área crecía progresivamente en un determinado momento se alcanzaba la saturación.

En ese proceso de crecimiento la ciudad se va deteriorando, envejeciendo, hasta que se estanca. Nuestro modelo de área urbana se mueve desde la fase de crecimiento a la de equilibrio (entendiendo por equilibrio el no crecimiento, el estancamiento), entre las cuales la población y la actividad económica se renuevan, son dinámicas.

A menos que exista una continua renovación de todos los tipos de usos, el consumo de suelo desmesurado convierte un área marcada por la innovación y el crecimiento en una caracterizada por el deterioro progresivo de la vivienda y el declive del producto industrial. Si la renovación del área viniera acompañada de una economía fuerte, saludable y dinámica, el proceso de estancamiento no se produciría.

Forrester examinaba el ciclo de vida de un área urbana usando los métodos de la dinámica industrial, cuyas investigaciones primeras datan del año 1956.

Los métodos dinámicos son aplicables a sistemas que cambian en el tiempo (biología, sistemas sociales, ecología y todos aquellos procesos que manifiestan realimentación positiva y negativa).

El modelo de crecimiento planteado comienza con un área urbana vacía para progresivamente crecer hasta alcanzar el consumo total de suelo que desemboca en el estado de estancamiento ó equilibrio.

Otra aplicación del modelo será analizar el estado que alcanza la ciudad partiendo de las condiciones de equilibrio que se alcanzan al final del ciclo de vida. Este equilibrio se emplea para explorar como cambios en determinadas políticas aplicadas sobre la ciudad pueden originar alteraciones en el área a lo largo de un período de tiempo de más de 50 años posteriores al punto inicial de equilibrio.

1.2. Estructura de un área urbana

La estructura del área urbana responde al diseño lógico de los sistemas dinámicos, lo que exige en primer lugar definir las **fronteras** o límites del sistema (closed-system boundary).

Las fronteras nos definen aquellos componentes necesarios para generar los modos de comportamiento que puedan resultar de interés.

También habrá que conocer las estructuras de los **bucles de realimentación** (Feedback-loop) y las variables:

- Variables de estado o nivel (level), que representan acumulación dentro del ciclo. Por ejemplo, el número de personas dentro de una ciudad.
- Variables de flujo ó índice (rate) que representan actividad dentro del ciclo, por lo que detectan posibles discrepancias en los valores, permitiendo llevar a cabo acciones correctoras.

La estructura del modelo de área urbana representa los procesos centrales comunes a todas las áreas urbanas, por lo que se omiten condiciones periféricas específicas de lugares particulares.

El modelo debe mostrar como un área se desarrolla desde el vacío hasta consumir el suelo disponible, originando el declive del sector constructivo e industrial, y como consecuencia, el estancamiento económico.

Cuando el área alcance esa fase de estancamiento, nos interesaremos por las políticas que revierten esa situación y producen el resurgimiento de la economía del área.

El comportamiento de la ciudad estará muy condicionado por el crecimiento económico y por los cambios internos del triángulo *industria, vivienda y población*.

En este contexto las áreas urbanas se comportarán de forma similar a un sistema viviente que se comunica con el medio ambiente o entorno exterior, si bien éste no influirá apreciablemente sobre dicho sistema.

Las variables de estado del sistema interno se dividen en tres bloques, conteniendo cada uno de ellos tres variables de estado.

Bloque 1: NEGOCIOS

1. Variable 1: nuevas empresas creadas en el área urbana. Cada empresa dispondrá de una determinada parcela de terreno edificable.
2. Variable 2: negocios ya consolidados. En el transcurso del tiempo la empresa alcanza la madurez y se consolida en el mercado.
3. Variable 3: declive de la industria. Al cabo de un tiempo la industria entra en declive y a continuación desaparece.

El paso de un determinado tipo de negocios a la categoría siguiente depende del tiempo transcurrido y de las condiciones globales de todo el sistema urbano.

Bloque 2: VIVIENDAS. Construcción, envejecimiento y demolición de viviendas.

4. Variable 4: Viviendas de lujo²¹
5. Variable 5: Viviendas para trabajadores²²
6. Variable 6: Infraviviendas²³

Las viviendas de lujo, habitadas por profesionales de alto poder adquisitivo, tienen un tiempo de obsolescencia o depreciación física al cabo del cual pierden su valor, para pasar a formar parte del tipo de viviendas para trabajadores.

A la vez se construyen viviendas del segundo nivel, que al cabo del tiempo se deterioran y pasan al nivel inferior, y cuyo período de obsolescencia depende del tiempo y de la demanda.

La última fase sería la que comprende la demolición de las infraviviendas.

Bloque 3: POBLACIÓN

7. Variable 7: Profesionales alto poder adquisitivo
8. Variable 8: Clase trabajadora²⁴. La componen aquellos trabajadores colocados en puestos conforme a sus capacidades.
9. Variable 9: Desempleados y trabajadores de bajo nivel²⁵.
Incluye: desempleados, no contratables, contratados en trabajos por debajo de sus aptitudes, empleados en actividades no reguladas (economía sumergida) y por último aquellos que no buscan trabajo pero que lo conseguirían sólo en períodos de intensa actividad económica.

Cada categoría tiene una tasa interna de nacimientos.

En el sistema global o interno existe una correspondencia directa entre las 3 categorías de viviendas y de población. El grupo de profesionales únicamente habitan viviendas de lujo, la masa trabajadora lo hace en viviendas para trabajadores y los desempleados en infraviviendas.

Sin embargo no existe correspondencia directa entre los bloques de negocios y población. Así, cada tipo de empresa contrata a todos los tipos de población, aunque también es cierto que una nueva empresa contrata más gente que un negocio consolidado.

²¹ Premium housing (PH)

²² Worker housing (WH)

²³ Underemployed housing (UH)

²⁴ Clase trabajadora: Labor (L)

²⁵ Underemployed (U)

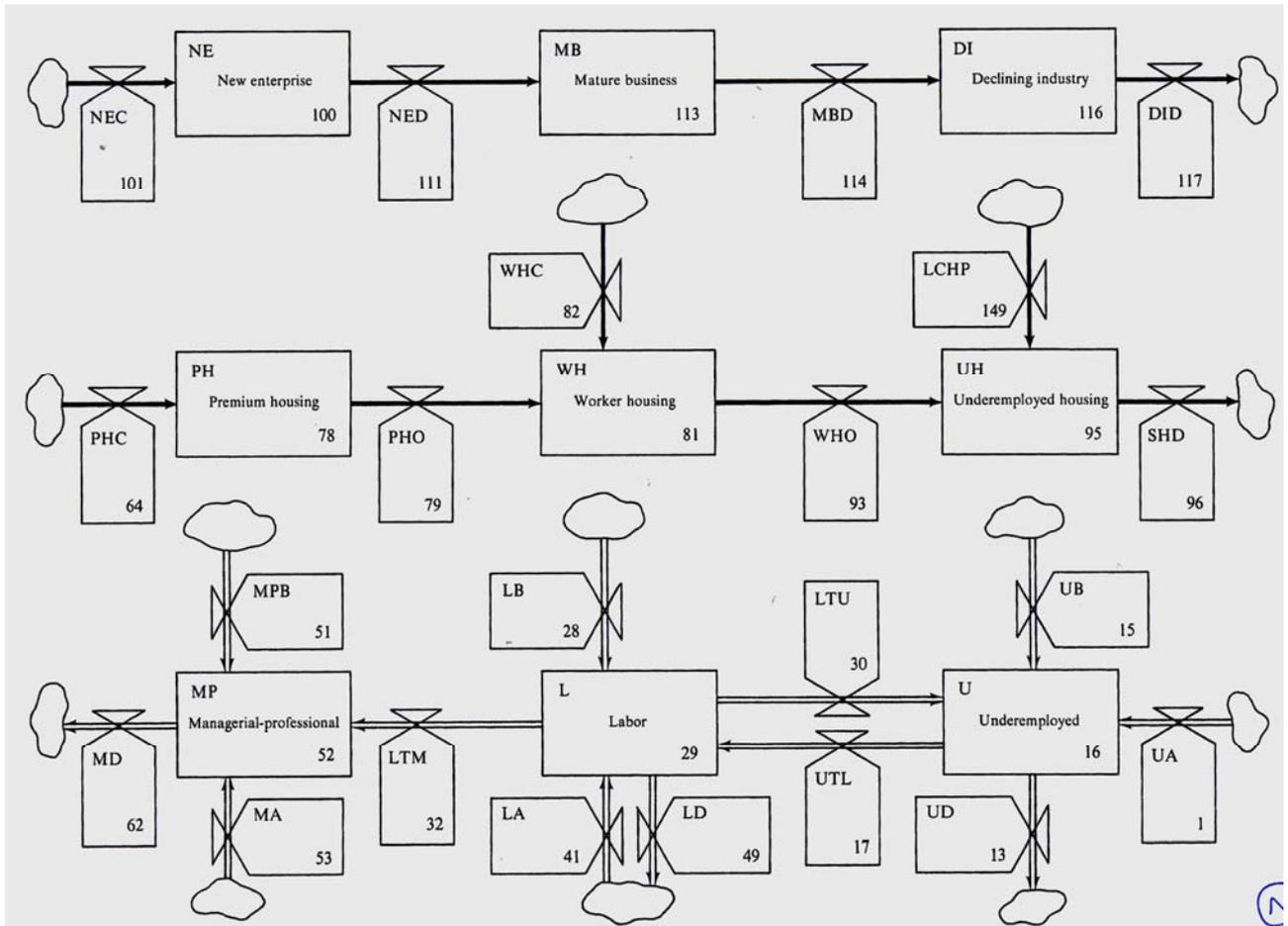


FIGURA 20. Diagrama de Forrester de área urbana

En el diagrama de la figura 20 vemos las variables principales ya mencionadas y algunas variables de flujo:

- PHO: Obsolescencia de las viviendas de lujo. El período de vida útil de estas viviendas se fija en 30 años.
- WHO: Obsolescencia de las viviendas para trabajadores. Período de vida útil definido en 50 años.
- SHD: Demolición de infraviviendas. Ratio que define el porcentaje de viviendas demolidas correspondientes a esta categoría, establecido en el 2%. Su período de vida útil es de 50 años.
- NED: Declive de nuevas empresas. Define el período de tiempo que tarda un negocio en consolidarse, que se establece en 12 años.
- MBD: Declive de negocios consolidados. Período de vida de un negocio consolidado. Establecido en 20 años.
- DID: Demolición de industrias en declive. Tiempo establecido para que una industria consolidada entre en declive, sea deficitaria y llegue a su disolución y posterior demolición. Establecido en 30 años.

Los cambios en vivienda, población e industria son los procesos centrales en el crecimiento y estancamiento de la ciudad. Y son, según el modelo, mucho más importantes que el gobierno de la ciudad, la cultura o la política fiscal.

El envejecimiento de la ciudad es concebido como un proceso interno, no impuesto u originado por los cambios que se producen en el medio ambiente exterior, aunque éste sí puede acelerar o retardar el proceso.

Según la figura 20, los niveles (rectángulos), los índices (válvulas) y las conexiones entre sí representan los componentes que se encuentran dentro de los límites dinámicos del sistema. Los símbolos representados mediante nubes son las fuentes o los sumideros de los flujos desde/hacia el medio ambiente exterior, controlados únicamente por condiciones dadas dentro del sistema.

Si los flujos desde/hacia son controlados únicamente por las variables de estado, el medio ambiente (entorno) exterior es implícitamente tomado como referencia.

Si las condiciones en el área urbana son más favorables que las del entorno, la población y la industria se moverán hacia ella, y en sentido inverso igualmente. El medio ambiente puede afectar al sistema, pero el sistema no afecta significativamente al entorno. En términos de lazos o bucles, no existen lazos que vayan del sistema al medioambiente y vuelvan.

Se pueden argumentar ejemplos en contra del concepto de área urbana como sistema dinámico cerrado, como que la mecanización de la agricultura o las hambrunas en áreas rurales han acelerado la migración hacia las ciudades, incrementando la presión sobre las mismas. Sin embargo, el desarrollo de esas ciudades no implica o no afecta a la mecanización de la agricultura de forma directa.

Por tanto, estas influencias no son bidireccionales y no las podemos considerar como causas principales del envejecimiento/estancamiento de las ciudades.

Igualmente el clima puede afectar a la emigración, pero la emigración nunca afectará al clima.

Por tanto, la relación sistema/entorno es de lazo abierto, permitiendo la separación del entorno de nuestro sistema dinámico.

La existencia de este tipo de límites cerrados dinámicos no implica que el área urbana se encuentre aislada. La población se desplaza más allá de los límites, existe comercio con el exterior, lo que no significa que los bucles de causa y efecto tengan influencia fuera de los límites y retornen.

Por ejemplo, la emigración produce el efecto de llenado de nuestra área urbana, la altera, pero no vacía el entorno.

El área urbana es representada como un ente vivo, un sistema autocontrolado que regula su propio flujo poblacional hacia/desde el entorno. Claramente se observa que la relación área/entorno no es estática.

Otras hipótesis de partida son que la tecnología, los estándares de bienestar y la naturaleza de la actividad económica en el área siguen el mismo ritmo que los del entorno.

El modelo muestra como el área llega a ser más o menos atractiva que otras ciudades o países circundantes, causando el movimiento poblacional desde/hacia en función de las diferencias de atracción sistema/entorno.

1.3. Escenarios

En las gráficas que se encuentran a continuación se puede observar el tipo de modelo de escenario inicial que se plantea, que corresponde a los procesos de crecimiento y estancamiento del área urbana.

En primer lugar se produce un proceso de desarrollo urbano, caracterizado por el aumento de todas las variables de estado, posteriormente un proceso de madurez y reajuste interno, donde las variables comienzan a descender, hasta alcanzar la última fase, la de estancamiento ó equilibrio.

Ese estancamiento en la actividad urbana dependerá del tipo de variable y de área urbana analizada, pero se maneja una cifra entre 80 y 180 años.

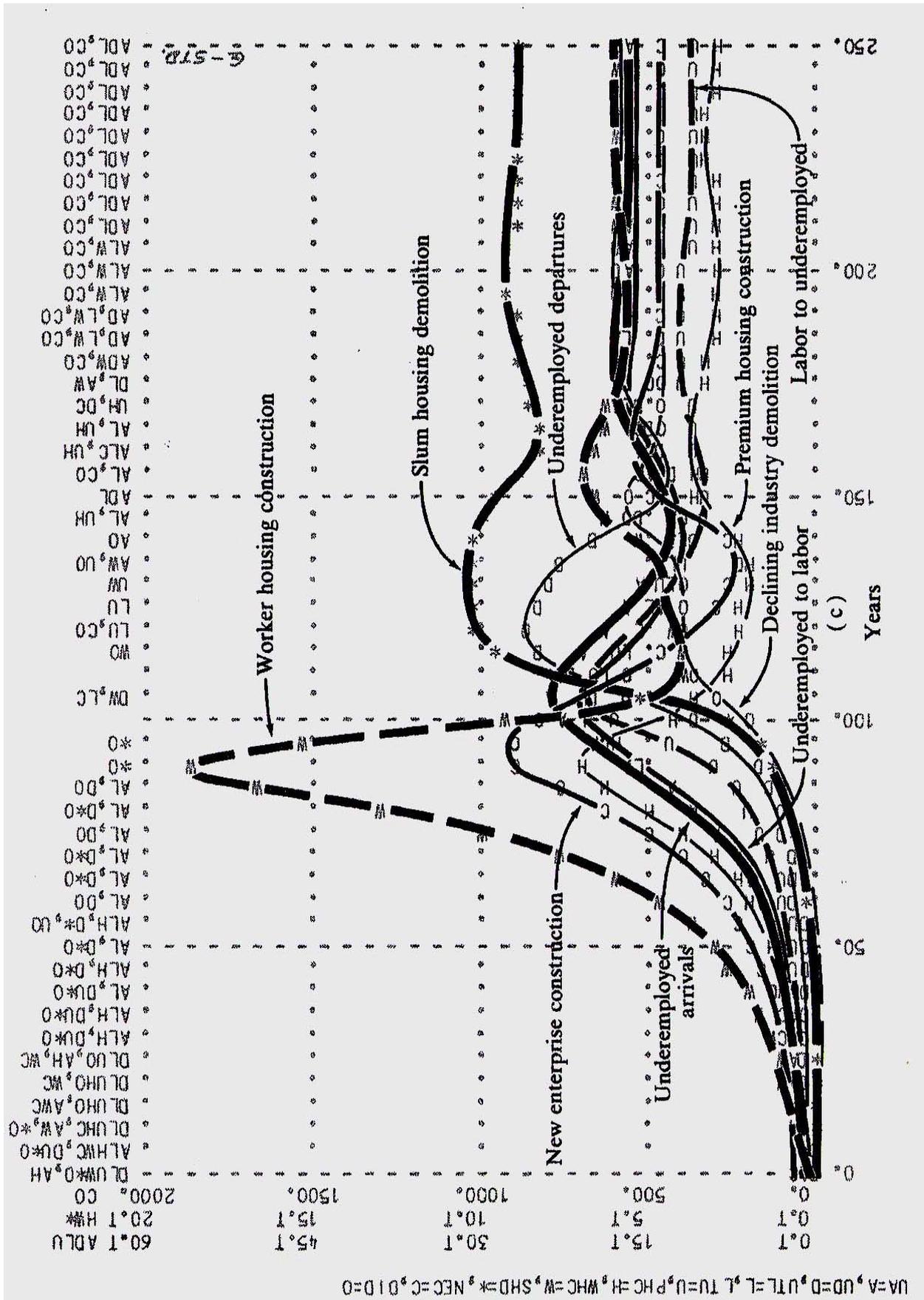
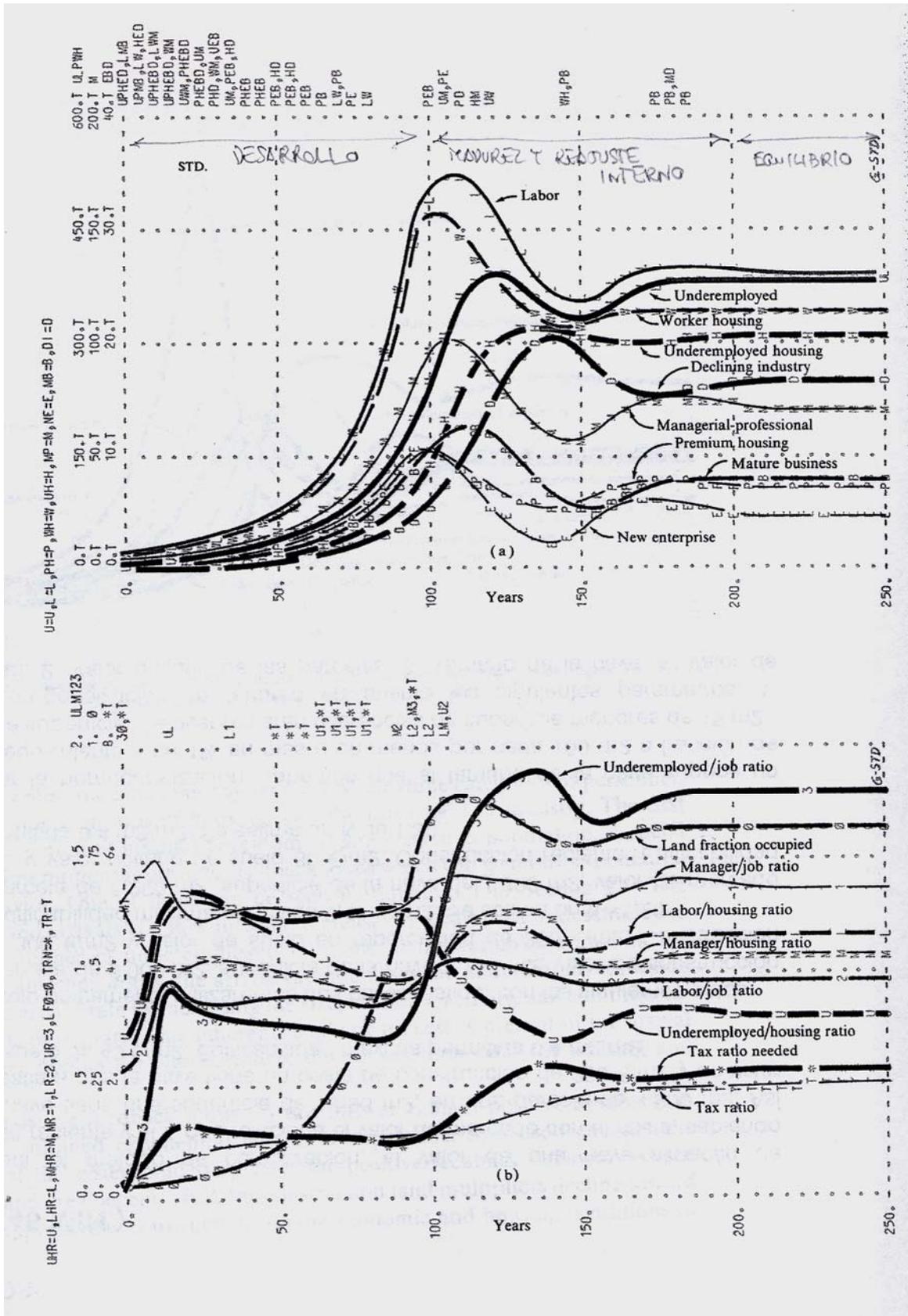


FIGURA 21. Dinámica urbana. Variables principales



FIGURAS 22-23. Otras variables relevantes

Posteriormente se plantean otros escenarios una vez alcanzado el estado de equilibrio ó estancamiento, en los cuales se introducen determinadas políticas gubernamentales para observar la evolución del sistema.

Se parte de las condiciones de equilibrio del área urbana, alcanzadas aproximadamente 250 años después del nacimiento de la ciudad, y como se observará a continuación, se puede aseverar que este tipo de políticas no mejoran la calidad de las ciudades, catalogándose como “**fracasos en los programas urbanos**”.

Estos nuevos programas tendrán una duración aproximada de 50 años. Entre ellos:

Programa de trabajo

Se introduce un programa de trabajo para los desempleados (U). La consecuencia primera es que se atrae a la ciudad más población de esta categoría. Cuando el programa se ha consolidado, la población U ha crecido demasiado y el ratio que indica la disponibilidad de trabajo para los desempleados (UR)²⁶ disminuye. El número de infraviviendas (UHR)²⁷ aumenta, habitadas por esta franja de población.

Programa de entrenamiento

Se busca la mejora de las aptitudes de los U gracias a programas de formación. La primera consecuencia de este programa es que ha aumentado el número de trabajadores que han pasado del nivel U al superior, el de los trabajadores (L)²⁸.

Pero al mismo tiempo, también se ha incrementado el número de trabajadores que hacen el camino contrario, es decir, que bajan en su cualificación.

Otra respuesta del sistema a este programa es que aumenta el número de U que llegan a la ciudad, gracias al atractivo inicial de esta política, pero también al cabo de cierto tiempo de implantación el número de U que abandonan la ciudad también aumenta. Mucha gente llega al área urbana por el programa y la abandonan cuando ven que no hay sitio para las aptitudes de las que disponen.

Como servicio a la sociedad el programa es exitoso, pero para la ciudad no está tan claro. Las consecuencias de esta política son que el área es más poblada, la fracción de tierra ocupada ha aumentado ligeramente, las condiciones de la vivienda son peores y el total de U se ha incrementado ligeramente.

Programa de ayuda financiera

Se le da un subsidio a las clases bajas. El número de desempleados aumenta. No se aprecian cambios en la actividad económica y en el número de trabajos disponibles. Ese aumento en la ayuda aportada por el gobierno de la ciudad hace que se incremente el ratio de impuestos²⁹. El ratio L a U disminuye.

Programa de construcción de viviendas de bajo coste

Se incrementa el número de viviendas demolidas. El número de viviendas para U aumenta un 45% por encima del que había antes de introducir el programa.

²⁶ Underemployed job ratio

²⁷ Underemployed housing ratio

²⁸ El ratio U a L

²⁹ TRN: tax ratio needed. Tasas o impuestos fijadas por el ayuntamiento (en %)

También el ratio tasas (TRN) aumenta mucho (más del 30%), mientras que el número de empresas disminuye.

Los programas de bajo coste añaden presión al área, ya que atraen población U y además se aumenta el índice de ocupación de suelo.

También es importante destacar que los ratios de población no son adecuados y además las tasas que se han incrementado hacen que disminuya la construcción de nuevos edificios que la ciudad necesita. Por último el ratio U a L disminuye hasta un 33%.



FIGURA 24. Tokio 2007

Pero también se simulan en el modelo de Forrester escenarios positivos, los que definimos como “**éxitos en los programas urbanos**”. Son aquellos que originan el resurgir urbano después de un período de estancamiento. Algunos de los planteados en el modelo son:

Construcción de viviendas para trabajadores

El número de viviendas para la clase trabajadora se ha incrementado ligeramente (alrededor del 5%). Todos los segmentos de población han disminuido. El número de negocios ha disminuido. Hay mayor disponibilidad de viviendas, pero el empleo para L y U ha empeorado.

Los resultados no son tan desfavorables como el del programa de construcción de viviendas de bajo coste, pero no existen mejoras sustanciales.

Construcción de viviendas de alta calidad

Al igual que en el caso anterior, la construcción de viviendas de lujo no supone una mejora importante para la industria.

Creación de nuevas empresas

Produce cambios favorables, aunque no se corrige suficientemente la balanza económica.

Además no es muy creíble que un programa de creación de nuevas empresas pueda ser liderado por instituciones públicas, por lo que siempre será más interesante mirar en la dirección de programas que caigan dentro de la autoridad gubernamental.

Demolición de industrias en declive

Gracias a esta iniciativa, el número de nuevas empresas se incrementa, e igualmente sucede con el número de negocios consolidados.

Disminuye el número de viviendas y de habitantes de la ciudad, y también los impuestos municipales.

Demolición de infraviviendas

El primer efecto del programa es que se incrementan el número de nuevas empresas y de negocios consolidados, al igual que en el caso anterior. Esta política de renovación del parque industrial favorece el abandono y posterior demolición de las industrias en decadencia y la creación en su lugar de otras más competitivas.

Como se potencian las clases más productivas, el número de viviendas para la clase alta y para los trabajadores aumentan, mientras que disminuyen el número de infraviviendas.

Los impuestos decrecen muy apreciablemente (por encima del 30%).

En contraposición con estas mejoras en la ciudad, el programa no incorpora ninguna acción para evitar la emigración de sus clases más desfavorecidas.

Otro aspecto a destacar de este programa es que la vitalidad de la ciudad genera reedificación en el suelo disponible y nuevos procesos para crear un balance económico saludable.

La ciudad genera vivienda de forma más rápida de lo que tarda en crear industria, por lo que habrá que buscar soluciones que favorezcan la expansión industrial mas que la de la vivienda, siempre que existan programas que no motiven la emigración de las clases bajas.

Disminución del volumen de viviendas construidas

Entran en acción 2 políticas combinadas, el programa de disminución del número de viviendas para trabajadores y el de demolición de viviendas de baja calidad.

El primer efecto es el incremento muy apreciable del número de negocios, tanto nuevos como consolidados, mucho más que el de negocios en declive.

El número de viviendas de clase alta y trabajadora también aumenta, y disminuye el de infraviviendas, éste último de forma muy apreciable (por encima del 50%).

También se produce un salto importante en el número de trabajadores cualificados, ya que la tasa U a L ha aumentado, indicando que la ciudad está permitiendo el salto cualitativo del empleo.

A causa del cambio, los impuestos aumentan.

Promoción de la industria

Políticas combinadas de tres tipos: demolición de viviendas de baja calidad, disminución del volumen de viviendas construidas para trabajadores y creación de nuevas empresas.

Aparece gran movilidad de trabajadores de U a L, superior al del apartado anterior, lo que implica que la ciudad ha sido capaz de generar un clima económico adecuado que fomenta la movilidad hacia el grupo L. Analizando el grupo U, el número de infraviviendas no ha disminuido demasiado.

La creación de nuevas empresas se realizará en áreas centrales de la ciudad, no en cinturones industriales de los suburbios, ya que en esas zonas el impacto económico es menor, surgiendo áreas económicamente saneadas mientras otras estarán aisladas y en declive. Se crearán empresas en áreas no excesivamente grandes, para evitar los espacios segregados de población e industria.

Con este último análisis se llega a la misma situación en el año 250 que en el 50, aunque a lo largo de toda la vida de la ciudad las condiciones económicas han sido saludables.

Variable	Symbol	Time (years)		Change (%)
		-5	50	
a. Slum-housing-demolition program	SHDP	0	8,770	—
b. Slum-housing demolition total rate	SHD	9,100	12,360	+36.
c. Worker-housing construction	WHC	5,900	7,700	+31.
d. New-enterprise construction	NEC	462	830	+80.
1. New enterprise	NE	4,900	8,000	+63.
2. Mature business	MB	7,800	12,000	+64.
3. Declining industry	DI	16,500	22,200	+35.
4. Premium housing	PH	110,900	152,800	+38.
5. Worker housing	WH	335,600	450,600	+34.
6. Underemployed housing	UH	310,100	175,300	-43.
7. Managerial-professional	MP	71,100	108,700	+53.
8. Labor	L	392,600	600,000	+53.
9. Underemployed	U	377,300	335,900	-11.
10. Manager/housing ratio	MHR	1.07	1.19	+11.
11. Labor/housing ratio	LHR	1.17	1.33	+14.
12. Underemployed/housing ratio	UHR	.81	1.28	+58.
13. Manager/job ratio	MR	1.38	1.36	-1.
14. Labor/job ratio	LR	.97	.98	+1.
15. Underemployed/job ratio	UR	1.81	1.07	-41.
16. Tax ratio needed	TRN	2.25	1.50	-33.
17. Underemployed to labor net	UTLN	5,500	9,200	+67.

FIGURA 25. Cambios causados por la política “promoción de la industria”

En el modelo de Forrester se puede afirmar que las nuevas y más satisfactorias políticas de desarrollo urbano pueden ser iniciadas en cualquier punto en el ciclo crecimiento-madurez-estancamiento, ya que aunque las condiciones transitorias se vean afectadas, el equilibrio final dependerá de las políticas y no de las condiciones iniciales de tiempo en el que las políticas se implementaron.

1.4. Análisis de sistemas complejos

1.4.1. Naturaleza de los sistemas complejos

Los distintos escenarios estudiados nos han permitido observar como el sistema se comporta ante modificaciones introducidas por factores extrínsecos, y gracias a esa forma de reacción, podemos determinar las características del mismo.

Ya se ha hablado mucho sobre sistemas complejos en apartados anteriores, pero indicar qué dentro de las dimensiones en las que nos estamos moviendo, algunos tipos serían áreas urbanas, gobiernos nacionales, procesos económicos, mercados económicos internacionales.... Indiquemos sus características principales :

- El sistema complejo tiene un orden. El orden de un sistema es determinado por el número de ecuaciones de nivel (estados) para describir el sistema. Una compañía puede tener variables de nivel para representar: empleados, balance bancario, inventario, maquinaria, aptitudes psicológicas... Para que un sistema se considere complejo debe tener como mínimo un orden 4-5. La adecuada representación de un sistema social puede ser de orden 10 a 100, y el sistema urbano es de orden 20.
- Los sistemas complejos deben tener bucles de realimentación positivos y negativos interrelacionados. Los bucles positivos generan los procesos de crecimiento y los negativos regulan los sistemas. El comportamiento de los sistemas sociales está íntimamente relacionado con esta interacción entre feedbacks + y -.
- Los sistemas complejos son no lineales. La no linealidad es fácil de aceptar cuando dejamos de pedir soluciones analíticas a los sistemas de ecuaciones y aceptamos la aproximación más empírica de la simulación.
- Son intuitivamente falsos. Así en los programas que fracasaron, éstos se habían planteado para solucionar determinados problemas que debido a la complejidad del sistema dieron resultados peores que los de partida. Por tanto, los cambios en las políticas deben ir en sentido opuesto a las tendencias que existan en el presente para conseguir el resurgimiento de las áreas urbanas. En los sistemas complejos la relación causa-efecto no aparece, ni en tiempo ni en espacio, aunque dicha causa es cercana en el tiempo y espacio a los síntomas observados.
- Son marcadamente insensibles a cambios en muchos parámetros del sistema. Como aspecto a destacar, los sistemas sociales están dominados por factores psicológicos y naturales que cambian muy poco en el tiempo.
- Resistentes a las políticas de cambio. La razón reside en su naturaleza intuitivamente contraria. Una política se compone de estructura (cómo la información disponible debe ser usada en una acción determinada) y parámetros. La insensibilidad de un sistema a la mayoría de los parámetros significa que es también insensible a la mayoría de las modificaciones que podríamos llamar políticas de cambio, porque a menudo las políticas son únicamente cambios en el grado de información del sistema.
- Se controlan a través de los puntos de influencia o de presión. Dichos puntos fuerzan la alteración del sistema. Si una política afecta a uno de estos puntos, la presión se traslada al

sistema. Los parámetros y cambios estructurales a los cuales el sistema es sensible no son generalmente evidentes, sino que deben ser descubiertos a través de examen cuidadoso del sistema dinámico.

- Largo plazo versus corto plazo. El cambio en un sistema complejo comúnmente causa en el corto plazo una respuesta en el sentido opuesto del largo plazo. Estas políticas serán problemáticas para aquellos líderes enfrentados con el problema de la revitalización del sistema urbano.

Por ejemplo, el programa de entrenamiento primero redujo el número de U y después siguió en el sentido inverso, con un valor final ligeramente superior al del comienzo. Este conflicto corto/largo plazo del sistema responde en parte al estado infeliz de los sistemas urbanos. Como la presión del voto y de los políticos obliga a priorizar consideraciones a corto plazo, el escenario está determinado para la degeneración a largo plazo.

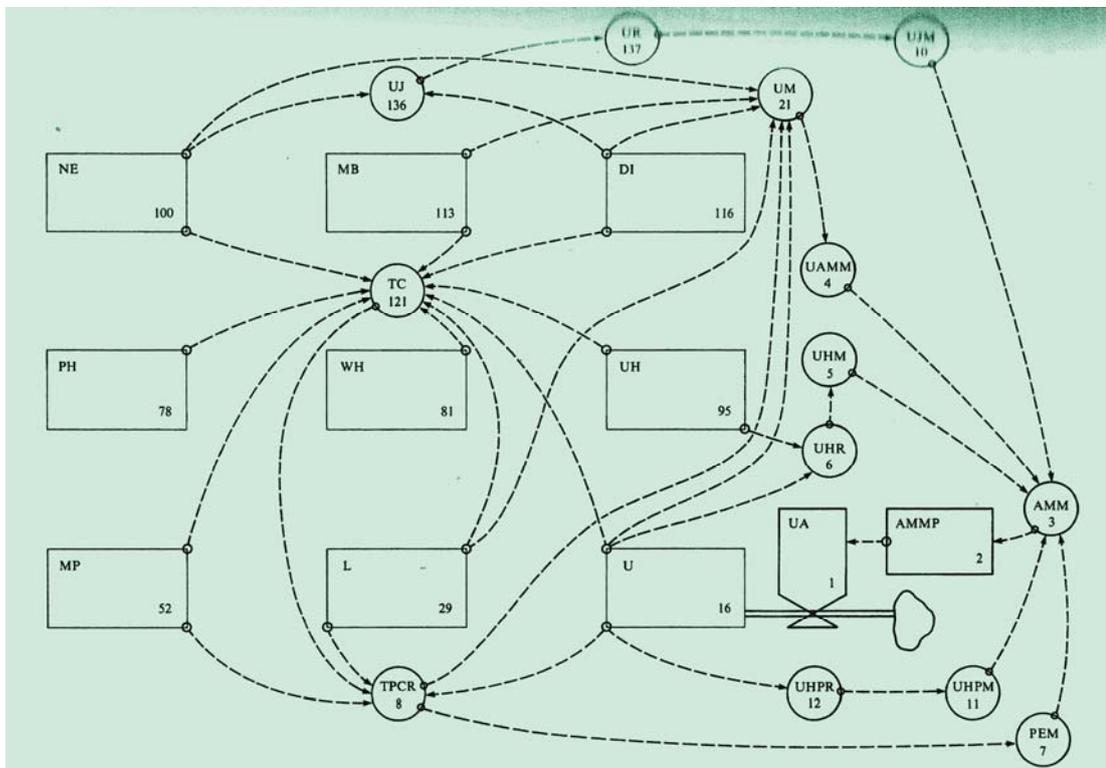


FIGURA 26. Variables de estado y su red de influencias

Donde :

- NE: Nuevas empresas creadas en el área urbana
- MB: Negocios ya consolidados
- DI : Industrias en declive
- PH: Viviendas de lujo

- WH : Viviendas para trabajadores
- UH : Infraviviendas
- MP : Profesionales alto poder adquisitivo
- L : Clase trabajadora
- U : Desempleados y trabajadores de bajo nivel

1.4.2. Modelado de los sistemas complejos

La simulación de un modelo describe el proceso dinámico y permite la manipulación de índices y niveles para generar un historial en concordancia con los componentes del sistema. Para validar ese modelo se evalúa en varias etapas.

En primer lugar, los principios básicos que sustentan el modelo pueden ser chequeados frente a la experiencia y los datos disponibles. En segundo lugar, su comportamiento dinámico puede ser comparado con el sistema real que representa. Y por último, los cambios introducidos en el modelo pueden relacionarse con los cambios similares que ocurren en la realidad.

Solo si entendemos el proceso que causa los problemas del sistema podremos esperar la reestructuración del mismo para cambiar el rumbo de los procesos sistémicos. Si el modelo sirve para diseñar situaciones complejas, debe contener todas las relaciones que interactúan dentro del sistema.

El modelo será cerrado, no dependiente en sus características inherentes de ninguna variable externa al sistema.

Se interconectarán disciplinas distintas. Para nuestro caso, se relacionarán la economía, la psicología y la física por ejemplo.

Disponer de poca información sobre el sistema no es una barrera importante para comprender la dinámica del modelo. Si la estructura del sistema está adecuadamente representada, los valores de los parámetros son de importancia secundaria, ya que similares comportamientos surgirán en ciudades que tengan diferentes condiciones económicas y tradiciones sociales.

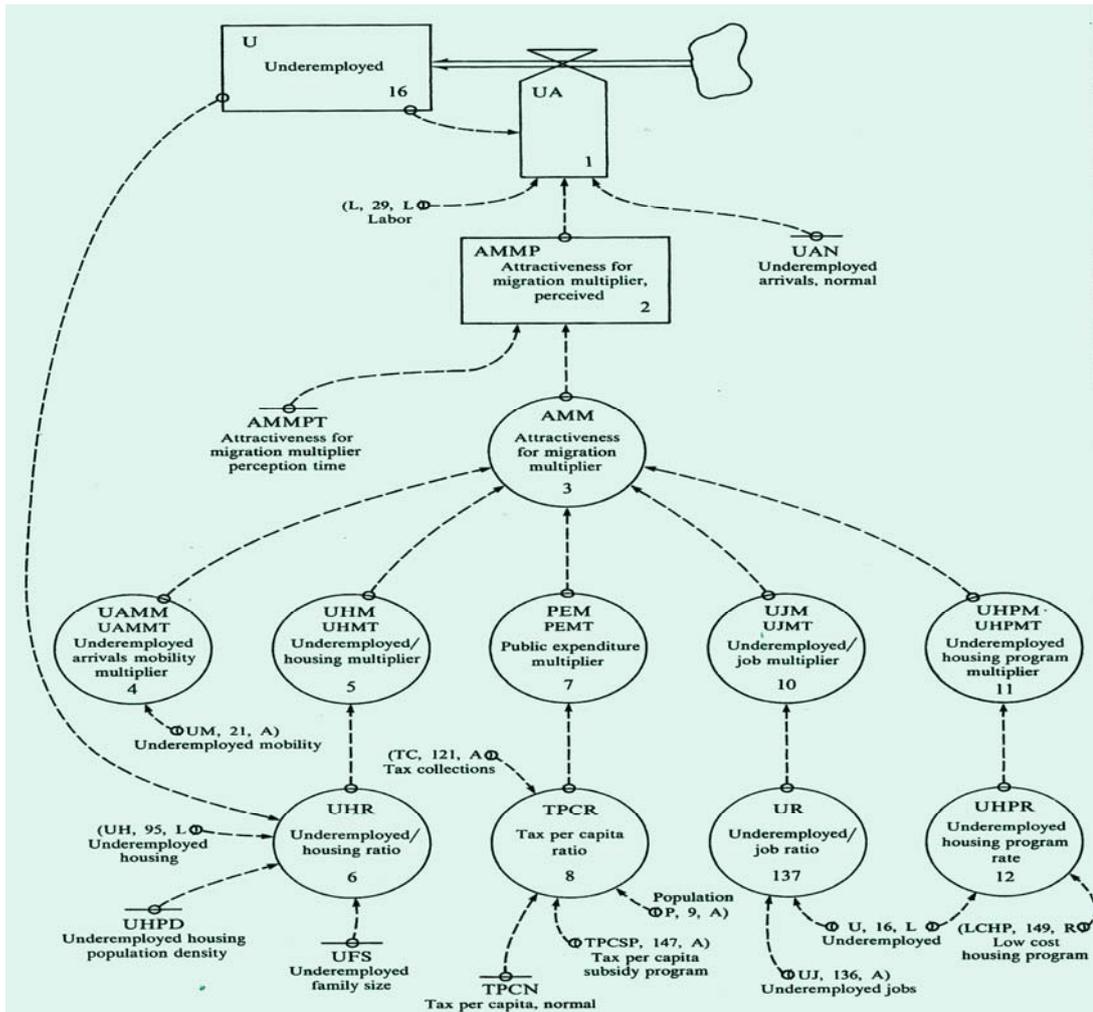


FIGURA 27. Diagrama de influencias de la variable “Entradas de U”

En la figura 27 se representa un diagrama de influencias de la variable “entradas de desempleados en el área urbana (UA)”, que depende de variables secundarias como:

- Atractivo del área para los inmigrantes: AMM
- Movilidad de los desempleados: UM
- Impuestos: TPCR
- Tamaño de las familias de los desempleados: UFS
- Trabajos para desempleados: UJ
- Programas de construcción de viviendas de bajo coste: LCHP

1.5. Reflexiones acerca del comportamiento de la ciudad

La vida fuera de la ciudad

Una ciudad saludable posiblemente generará industrias y puestos de trabajo cualificados por encima de los que puede absorber el área urbana, por lo que estos hombres y empresas se marcharán a otros núcleos de economías emergentes.

Igualmente, ciudades en crecimiento pueden absorber población de bajo estrato social a mayor velocidad que áreas en fase de estancamiento.

Para la regulación de la población del área urbana se establecerán políticas sociales de control poblacional. Las áreas urbanas compensadas contribuyen a elevar el nivel de vida de todo el país.

La ciudad en su entorno

Durante un período de crecimiento la antigüedad de las viviendas es baja, y éstas son ocupadas por aquellos trabajadores empleados en actividades de los negocios emergentes, extendiéndose la ciudad como un gran centro industrial y comercial rodeado de zonas residenciales.

Pasada la fase inicial de crecimiento, las viviendas serán una barrera para la expansión de los negocios, por lo que se deteriorarán y no serán atractivas para aquellos trabajadores con mayores ingresos.

En una segunda fase se construye un anillo alrededor del primero en condiciones similares. En el primero se asientan los de menores ingresos, el centro progresivamente se hace menos atractivo. Después de un período de ajuste, los suburbios comienzan a ser autosuficientes, con el desarrollo de industrias dentro y fuera de sus límites. Cuando las viviendas del centro de la ciudad se demuelan, comenzará el proceso de rejuvenecimiento.

Cuando la ciudad alcanza el equilibrio estamos en condiciones de estancamiento, que se caracteriza en primer lugar porque la relación entre número de infraviviendas y el número de industrias es excesivo. Además, la población ha envejecido considerablemente, por lo que gran parte de la misma no trabaja, lo que implica que la mano de obra para la industria ha disminuido, y lógicamente al mismo tiempo ha cambiado la población que ocupa ese tipo de viviendas.

Para cualquier clase de persona que viva en la ciudad, las condiciones en el área deben ser aproximadamente iguales en atractivo que las condiciones en cualquier otro lugar.

El poder de atracción de la ciudad depende de factores como la movilidad, la disponibilidad de viviendas, las tasas públicas, trabajo accesible y programas gubernamentales específicos. Factores secundarios para el modelo serían el clima, las restricciones políticas o las restricciones a la inmigración.

Alternativas de apertura de la ciudad

Para que la ciudad se revitalice hay que diseñar programas que corrijan las deficiencias observadas, que alteren el sistema interno que ha creado las deficiencias.

Los dos componentes que más influyen en el movimiento de la ciudad y el crecimiento económico son el trabajo y la vivienda.

La condición natural de envejecimiento de la ciudad tiende hacia mucha vivienda y poco trabajo para los desempleados, por lo que el área urbana deja de ser atractiva, atrayendo población poco cualificada a la que le ofrece pocas oportunidades.

La revitalización de la ciudad pasa por buscar políticas a largo plazo, como por ejemplo, introducir políticas de educación para incrementar la comprensión pública de la dinámica urbana y generar apoyos para los objetivos a largo plazo que pueden cambiar el proceso de envejecimiento.

Dando tiempo, un área desintegrada será reconstruida si tiene potencial económico. La ciudad dinámica es aquella que acepta un flujo elevado de población desempleada procedente del entorno, pero que una vez integrada, rápidamente asciende hasta la categoría de clase trabajadora.

Manteniendo el balance económico

Las políticas deben favorecer industrias que sean rentables, que paguen tasas importantes a las administraciones y que tengan una intensa actividad.

Según el análisis de Forrester, la estructura de impuestos tiende a penalizar a aquellos que contribuyen más al bienestar de la ciudad, mientras favorece a los que generan más costes, lo que a largo plazo favorece el crecimiento de las ciudades. Él plantea que los impuestos deberían ser evaluados en función de cómo cada cuál contribuye al coste y renovación del balance de la ciudad, introduciendo posibles exenciones fiscales para aquellas instituciones, industrias, etc. que más contribuyen al desarrollo de la ciudad.

Una propuesta sería la zonificación del suelo, lo que obligaría a zonas residenciales más restringidas, áreas industriales más extensas y usos no mezclados.

La zonificación y la distribución de tasas deben hacer posible diseñar un sistema que promueva o aliente a los propietarios a tomar acciones de autoprotección en sus negocios y viviendas que generen renovación en la ciudad.

Elección de presión urbana

Debe existir algún tipo de presión en el sistema. En el estado de equilibrio esas presiones se manifiestan en el envejecimiento de los edificios, el declive de las industrias, el aumento de las tasas o la descompensación del balance poblacional.

Pero también el modelo de renovación introduce presión sobre el sistema, ya que genera exceso de trabajo, menor número de viviendas y mayor desarrollo de la industria.

Para resolver la presión sobre el sistema, se puede incidir sobre el transporte urbano, que permite la intercomunicación entre industrias, lo que favorece la descentralización y la comunicación efectiva entre ciudades.

Por tanto, es necesario que una ciudad dispuesta para la renovación permanente también lo esté para asumir las presiones del sistema.

La ciudad dueña de su destino

La ciudad debe poder mejorar desde dentro.

Una ciudad no necesita necesariamente políticas nacionales, ya que los procesos de renovación

internos deben generar el crecimiento económico.

Algunas políticas para una correcta gestión urbana serían:

- Demolición de viviendas de baja calidad, sustituidas por suelo para industrias, parques...
- Recolocación de desempleados hacia la categoría de clase trabajadora y movilidad económica para mejorar las condiciones de bienestar.
- Recolocación económica: sustitución de viviendas viejas por nuevas y de industrias en declive por nuevos negocios.

1.6. Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad sirven para medir como los parámetros del sistema se comportan ante cambios introducidos en él mismo.

Para ver la sensibilidad del sistema respecto a los parámetros deberíamos hacernos preguntas como:

¿Afectan al crecimiento, estabilidad o equilibrio del sistema?

¿Pueden ser controlados?

¿Cambios en los parámetros pueden afectar a la selección o uso de otros parámetros que se emplean en la mejora del sistema?

Según Forrester, la mayoría de los parámetros de los sistemas complejos son insensibles, y los que son más sensibles no suelen verse influidos por las políticas de mejora.

También puede ocurrir que las políticas se vean afectadas por los parámetros, como es el caso del parámetro vivienda.

También el análisis de parámetros externos al sistema nos puede dar pistas de la sensibilidad del sistema ante cambios. Así, en el estudio del modelo se ha llegado a la conclusión de que una mejora en el entorno no conseguirá resolver los problemas de las ciudades.

En definitiva, el análisis realizado a nuestra área urbana ha permitido obtener un modelo que simula el comportamiento de una extensión poblacional e introducir distintos escenarios que han puesto en evidencia el comportamiento de los parámetros que lo definen.

2. Dinámica global/mundial

2.1. Extralimitación

Jay W. Forrester inicia el estudio de los modelos dinámicos mundiales en su libro *World Dynamics*, en el cual presenta dos modelos para simular el comportamiento del mundo, *World 1* y *World 2*. Posteriormente, en 1972 varios investigadores del MIT, entre ellos Donella H. Meadows y Dennis L. Meadows presentan el informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad, recogido en el libro “*Los límites del crecimiento*”, en el que se emplea un modelo de dinámica global denominado *World3*, basado lógicamente en los desarrollados por Forrester.

Este informe realiza la valoración del efecto del crecimiento de la población y de la actividad humana en un mundo de recursos limitados, y supone la primera señal de alarma sobre los efectos de la actividad humana sobre el planeta.

Poco a poco esa alarma se extiende a todo el mundo y a todos los estamentos, culminando en cumbres donde se debaten aspectos como crecimiento y desarrollo sostenible (Río de Janeiro, Kyoto, etc.).

En la cumbre sobre desarrollo sostenible de Río+10 (2002) se redactó un informe en el que se debatieron aspectos que hasta no hacía mucho tiempo eran impensables. Allí se acordó reducir a la mitad el número de personas que carecen de acceso al agua potable y sistemas de saneamiento, fijando como fecha límite 2015, reducir la pérdida mundial de biodiversidad con fecha límite de 2010 o recuperar los caladeros mundiales para una producción máxima sostenible hasta la fecha de 2015.

Actualmente muchas de las políticas que se acordaron en todas esas cumbres están en vigor, con mayor o menor tasa de éxito. Lo que quedará claro en el siguiente capítulo³⁰ es que la dinámica mundial está en fase de extralimitación tendente al colapso.

Así lo indican las siguientes cifras:

- La producción per cápita mundial de cereales tocó techo a mediados de los 80.
- Las perspectivas de aumento significativo de la producción pesquera marítima se han esfumado.
- 54 países, que abarcan el 12 % de la población mundial experimentaron un descenso del PIB per cápita durante más de 1 decenio en el periodo entre 1990 y 2001

Y esa dinámica mundial se verá reflejada en el modelo *World 3*, que se caracteriza por:

- Introducir un modelo de dinámica sistémica actual y aplicarlo a un problema actual. De hecho, este nuevo informe se termina de redactar en 2002, y emplea un modelo de simulación que actualiza el *World3*, usado también como herramienta de trabajo por los investigadores que conforman el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), reciente premio Nobel de la Paz 2007 compartido con Al Gore.

³⁰ Gran parte de los análisis e imágenes que se recogen en este capítulo proceden del libro “*Los límites del crecimiento 30 años después*”, cuyos autores, Donella Meadows, Jorgen Randers y Dennis Meadows, son los mismos que redactaron el informe al Club de Roma 30 años antes.

- Incorporar conceptos novedosos desde el punto de vista de la sostenibilidad: huella ecológica, índice de bienestar, exlimitación, colapso, e insertarlos en un medio que permite su fácil comprensión.
- Establecer en el desarrollo del modelo una metodología de escenarios muy útil tanto para entender la creación de modelos de dinámica sistémica como para encajar propuestas de sostenibilidad en ámbitos tan variados como la ecología, la biología, la construcción o la arquitectura.

Huella ecológica

El concepto de huella ecológica, ya mencionado anteriormente, es introducido por Mathis Wackernagel, que midió la huella ecológica de la humanidad y la comparó con la capacidad de carga del planeta. De acuerdo con su definición, la huella ecológica es la extensión de tierra que sería necesaria para suministrar los recursos (cereales, pienso, leña, pescado y terreno urbano) y absorber las emisiones (CO_2) de la sociedad mundial³¹. Al compararlo con la extensión de tierra disponible, Wackernagel concluyó que el consumo humano de recursos se situaba actualmente un 20% por encima de la capacidad de carga mundial, lo que implica que para alcanzar la sostenibilidad, la humanidad tendría que incrementar el consumo de recursos de los pobres del mundo y al mismo tiempo reducir la huella ecológica total.

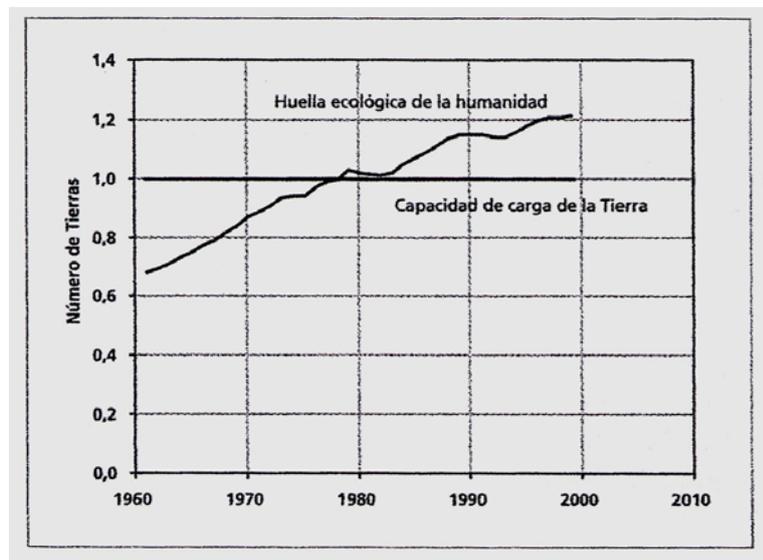


FIGURA 28. Huella ecológica y capacidad de carga.

Índice de desarrollo humano

Otro concepto importante a definir es el Índice de desarrollo humano, que se expresa como la media aritmética del índice de esperanza de vida, del índice de educación y el índice del Producto Interior Bruto (PIB). Es similar al Índice de Bienestar Humano (IBH).

³¹ Otra definición: tierra cultivable + tierra urbana + tierra para neutralizar la emisión de contaminantes

Según lo dicho, el mundo ha entrado en fase de extralimitación, ya que la huella ecológica de la humanidad ha superado la capacidad de carga del planeta. Podemos enumerar algunas de las causas que la han originado:

- Crecimiento, aceleración, cambio rápido: físico, organizativo, financiero...
- Los límites/barreras que impiden el correcto funcionamiento del sistema dinámico. Dichos límites pueden ser de tiempo, de espacio, políticos...
- Desfase o error de percepción en las respuestas encaminadas a mantener el sistema dentro de sus límites, debido al retraso en la información, a la burocracia aparatosa, a una teoría falsa sobre el funcionamiento del sistema, o a la dinámica que impide parar el sistema rápidamente pese a todos los esfuerzos por detenerlo.

Para conocer las causas y consecuencias a largo plazo del crecimiento para la población humana debemos disponer de herramientas. Entre ellas están las teorías científicas y económicas sobre el sistema global, los datos sobre recursos mundiales y el medio ambiente, los modelos informáticos que ayudan a integrar esta información y por último, y quizás la más importante, una nueva visión del mundo, que consiste en un conjunto en sí mismo coherente de creencias, actitudes y valores: un paradigma, un modo básico de mirar la realidad, lo que sería la perspectiva sistémica.

Esta superación de los límites viene impulsada por el crecimiento exponencial, que analizaremos en profundidad en el siguiente apartado.

En el mundo rico, el crecimiento se considera necesario para el empleo, la movilidad social ascendente y el progreso tecnológico. En el mundo pobre, parece ser el único camino para salir de la pobreza.

Los límites del crecimiento no limitan el número de personas, automóviles, casas o fábricas, al menos no directamente. Lo que limitan es el *caudal productivo*, es decir, los flujos continuos de material y energía que se precisan para mantener funcionando a la población, automóviles, casas y fábricas. Limitan el ritmo al que la humanidad puede extraer recursos y emitir residuos sin superar la capacidad de producción o de absorción del planeta.

Las fuentes del planeta las componen los yacimientos minerales, los acuíferos y las reservas de nutrientes en el suelo. Los sumideros son la atmósfera, los cuerpos acuáticos de superficie y los vertederos.

Definimos como límites físicos los límites de la capacidad de los sumideros del planeta para absorber la contaminación y los residuos.

Una vez introducidos los conceptos de límite, fuente y sumidero, podemos señalar dos aspectos fundamentales de la situación del planeta en la actualidad:

- Los flujos de caudal productivo generados actualmente por la economía humana no pueden mantenerse en sus niveles actuales durante mucho más tiempo.
- Los altos niveles actuales del caudal productivo no son necesarios para sostener un nivel de

vida digno de todos los habitantes del planeta, ya que la huella ecológica podría reducirse si disminuye la población, se cambiaran las pautas de consumo o se emplearan tecnologías que permitieran un uso más eficiente de las fuentes³²

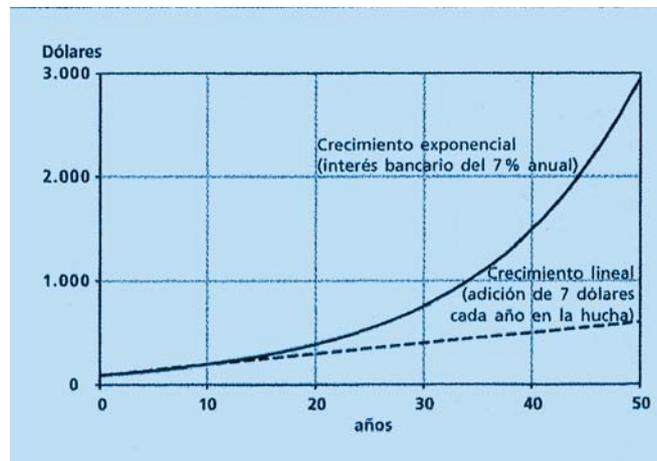


FIGURA 29. El crecimiento exponencial aplicado al ahorro

³² World scientists': Warning to humanity (Diciembre 1992)"...los seres humanos y el mundo natural siguen una trayectoria que conduce a la colisión. Las actividades humanas menoscaban violentamente y a menudo de modo irreversible el medio ambiente y recursos cruciales. Si no se revisan muchas de las prácticas actuales se pone gravemente en peligro el futuro que deseamos para la sociedad humana y los reinos vegetal y animal y puede que se altere el mundo vivo hasta el punto de que ya no sea capaz de sostener la vida del modo que conocemos. Urgen cambios fundamentales si queremos evitar la colisión a que conduce nuestro rumbo actual..."

2.2. Crecimiento exponencial

Una magnitud crece exponencialmente cuando su incremento es proporcional a la cantidad preexistente³³.

Nuestro sistema mundial actual crece exponencialmente, en población, en producción de alimentos, en producción industrial, en consumo de recursos y en contaminación, un crecimiento que en un espacio finito con recursos finito no es perdurable.

PERÍODOS DE DUPLICACIÓN	
<i>Tasa de crecimiento (% anual)</i>	<i>Períodos de duplicación aproximados (años)</i>
0,1	720
0,5	144
1,0	72
2,0	36
3,0	24
4,0	18
5,0	14
6,0	12
7,0	10
10,0	7

FIGURA 30. Crecimiento. Períodos de duplicación

Este tipo de crecimiento se produce de 2 maneras distintas:

- Si una entidad se autorreproduce, lleva inherente su crecimiento exponencial. Por ejemplo, la población de seres vivos.
- Si una entidad es impulsada por algo que crece exponencialmente, su crecimiento es derivado.

Y se origina por los ciclos de realimentación, que pueden ser:

- Ciclos de realimentación positivos: cadena de relaciones de causa y efecto cerrada en sí misma que genera un cambio que se autorrefuerza.
- Ciclos de realimentación negativos. Contrarrestan o invierten o equilibran la influencia causal a lo largo del ciclo.

Las existencias de capital industrial son otro elemento que puede experimentar un crecimiento exponencial intrínseco, pues las máquinas y fábricas pueden crear colectivamente otras máquinas y fábricas. Tanto el capital físico como el monetario permiten generar más capital de modo autorreproductivo.

También el cambio climático comporta varios factores de realimentación positivos. Por ejemplo la emisión de GEI³⁴ hace que aumente la temperatura, lo que acelera la fusión de la tundra ártica, que a

³³ Una fórmula sencilla para establecer el período de duplicación es $72/\text{tasa crecimiento}$.

³⁴ GEI: Gases de Efecto Invernadero

medida que se descongela se libera el metano atrapado en ella, que al ser un potente GEI puede facultar a que aumente todavía más la temperatura del planeta.

Sin duda los procesos de crecimiento que rigen el comportamiento de la población y la industria han sido las principales fuerzas motrices que han empujado a la sociedad mundial fuera de sus límites.

Otras magnitudes, como la producción de alimentos, el consumo de recursos y la contaminación tienden a crecer exponencialmente, pero no porque se automultipliquen, sino porque son impulsadas por la población y el capital. Por tanto, en la medida en que la producción de alimentos y el consumo de materiales y energía han crecido exponencialmente no lo han hecho por su propia capacidad estructural, sino porque el crecimiento exponencial de la población y la economía han demandado más alimentos, materiales y energía y se ha conseguido producirlos.

De igual modo, la contaminación y el volumen de residuos no han crecido porque tengan su propia estructura de realimentación positiva, sino debido a las crecientes cantidades de materiales que circulan y de energía que se consume en la economía humana.

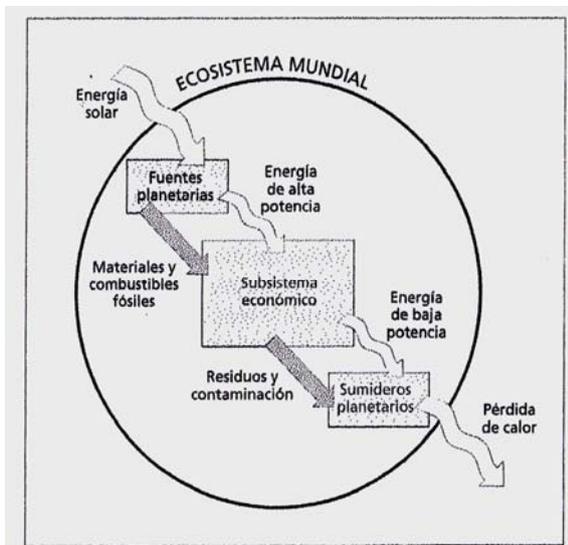


FIGURA 31. Población y capital en el ecosistema mundial

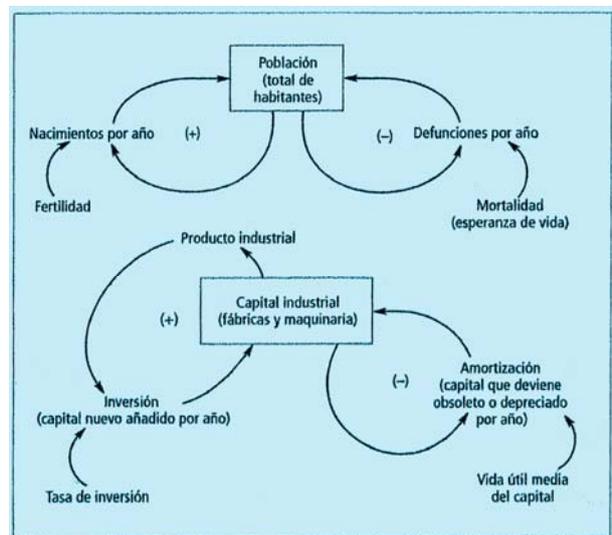


FIGURA 32. Ciclos de realimentación que rigen el comportamiento de la población y el capital

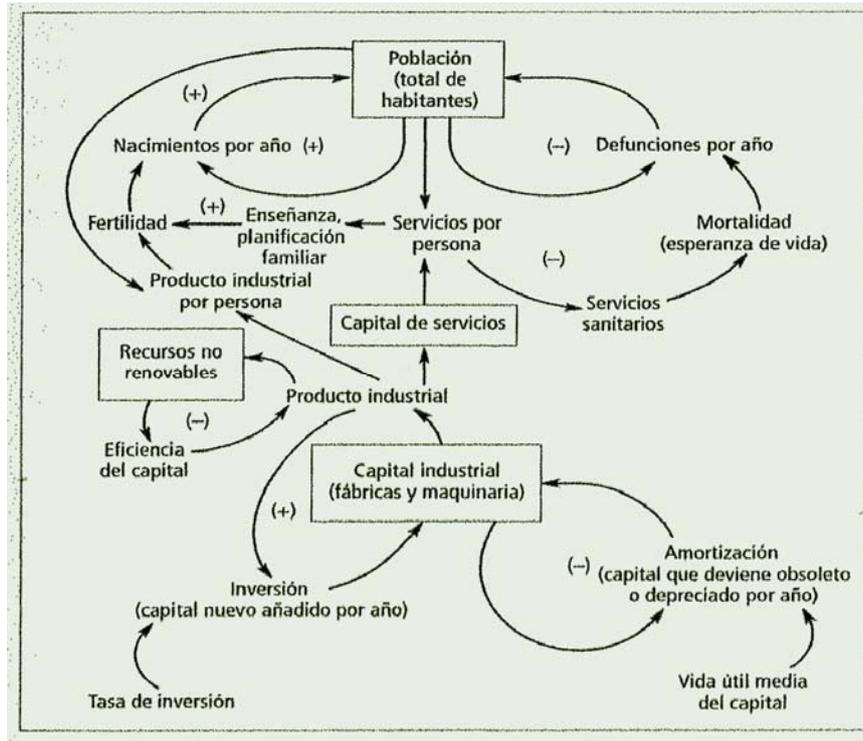


FIGURA 33. Ciclos de realimentación de la población, el capital, los servicios y los recursos

En la gráfica superior vemos los ciclos de realimentación que rigen el crecimiento de la población y el capital. La tasa de crecimiento de la población se define como la diferencia entre fertilidad y mortalidad y depende de factores económicos, ambientales y demográficos, como por ejemplo la renta³⁵, la educación, la sanidad, las tecnologías de planificación familiar, la religión, los niveles de contaminación...

Más importante que la renta son factores como la educación y el empleo, la planificación familiar, una baja mortalidad infantil y una distribución relativamente igualitaria de la renta y las oportunidades.

³⁵ Renta per capita = RNB por persona y año; RNB = PIB + ingresos del exterior; PIB = valor monetario de la producción de bienes y servicios dentro de las fronteras nacionales.

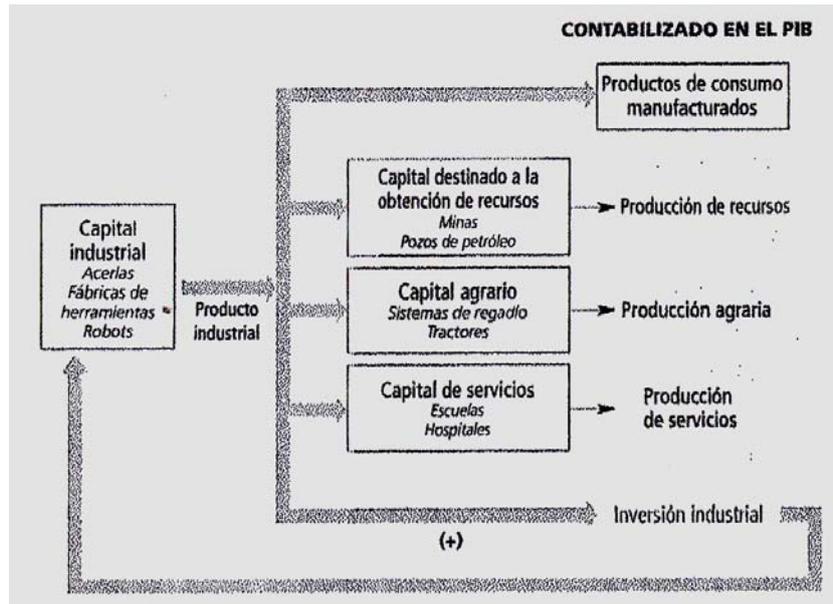


FIGURA 34. Flujos de capital físico en la economía de World3

Para el crecimiento industrial también podemos observar el ciclo de realimentación.

Las economías preindustriales (agrarias y de servicios) son las que inician el ciclo de crecimiento de capital. Después, en la fase industrial, crecen todos los sectores económicos, pero durante un tiempo es el sector industrial el que crece más rápidamente. Después, una vez creada la base industrial, el crecimiento ulterior se da en el sector servicios, aunque la base industrial debe mantenerse.

Con los modelos de crecimiento exponencial actuales se perpetúa la pobreza y se ensanchan la brecha entre ricos y pobres. Así, en 1998, más del 45% de la población mundial tenía que vivir con una renta media de 2 dólares al día más o menos o un hogar africano consumía en 1997 un 20% menos que en 1972.

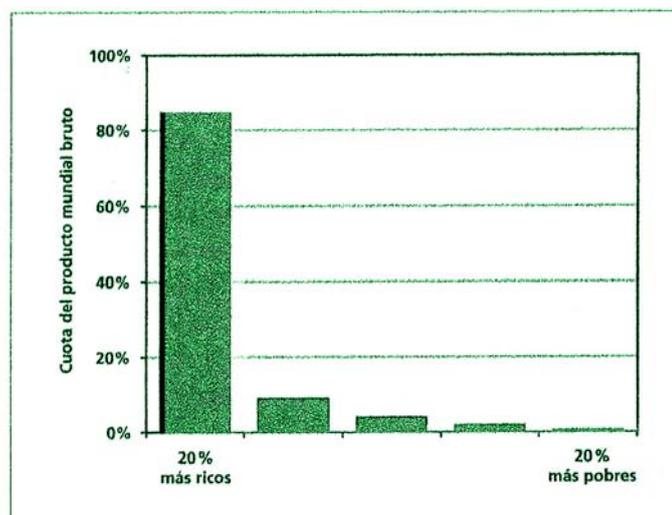


FIGURA 35. Disparidades mundiales

El crecimiento de siempre ha ampliado la brecha entre ricos y pobres.

Primero, debido a una estructura perversa de mecanismos sociales que otorgan sistemáticamente a los privilegiados el poder y los recursos para adquirir todavía más privilegios, como la discriminación étnica, las ventajas fiscales (para ricos), la inferioridad de nutrición para los niños de los países pobres, mejores escuelas para los hijos de los ricos o dinero para obtener influencia política.

Son los llamados *ciclos de realimentación de fortuna para los afortunados*.

Y en segundo lugar, a las poblaciones ricas les resulta más fácil ahorrar, invertir y multiplicar su capital que a los pobres. Los ricos no solo tienen más poder para controlar las condiciones del mercado, comprar nuevas tecnologías y reclamar recursos, sino que además varios siglos de crecimiento les han permitido crear grandes existencias de capital que se automultiplican. La mayoría de sus necesidades están cubiertas, por lo que pueden alcanzar elevadas tasas de inversión sin privar a la población de bienes esenciales. El bajo crecimiento demográfico permite dedicar una proporción mayor de la producción al logro del crecimiento económico y una parte menor a la satisfacción de las necesidades sanitarias y educativas.

En los países pobres, por el contrario, el crecimiento del capital difícilmente podría mantener el ritmo del crecimiento de la población. La producción que podría reinvertirse se precisará más probablemente para construir escuelas y hospitales y para satisfacer las necesidades de consumo de subsistencia. La economía crecerá lentamente. La transición demográfica se estanca en la fase intermedia, con una gran distancia entre tasas de natalidad y mortalidad.

¿Es la pobreza la que hace que crezca la población o es el crecimiento de la población el que origina la pobreza?

Es el *Ciclo de menos fortuna para los ya desafortunados*.

Un gran logro agrícola (el enorme aumento de la producción de alimentos) a nivel mundial ha sido absorbido en gran medida no para alimentar suficientemente a las personas, sino para alimentar insuficientemente a más personas, acelerando además del deterioro de las tierras, las aguas, los bosques y los ecosistemas.

Por otra parte, las mejoras sociales pueden reducir la tasa de crecimiento de la población. También mayores inversiones en capital industrial producen más bienes y servicios, lo que ayuda a reducir todavía más el crecimiento de la población.

En determinadas regiones ya se están aplicando estas políticas. Pero en otras no.

Esas poblaciones ancladas en la pobreza y con un crecimiento veloz corren el grave peligro de ver frenado dicho crecimiento no por el descenso de las tasas de natalidad, sino por el aumento de las tasas de mortalidad. Zimbabwe, Botswana, Namibia o Zambia alcanzarán tasas de crecimiento de población cero a comienzos del siglo XXI debido a la muerte de jóvenes, adultos y niños a causa del SIDA.

Resumiendo, si la huella ecológica ha crecido más allá del nivel sostenible, como ya ha ocurrido, al final tendrá que volver a descender, bien a través de un proceso controlado (por ejemplo, mediante un rápido aumento de la ecoeficiencia) bien por obra de la naturaleza (por ejemplo, debido al descenso del consumo de madera a medida que desaparecen los bosques).

2.3. Límites: fuentes y sumideros

Para que una determinada área habitada pueda crecer en el tiempo son necesarios dos requisitos, por una parte que se satisfagan las necesidades físicas, es decir existencia de tierras fértiles, minerales, metales, energía..., y por otro, las necesidades sociales, como la estabilidad social, justicia y seguridad personal, educación, bases institucionales para el progreso técnico constante...

Centrándonos en las necesidades físicas, para poder definir los límites sostenibles del caudal productivo de material y energía emplearemos el siguiente criterio:

- Para una fuente renovable (suelo, agua, bosques, peces), la tasa de consumo sostenible no debe ser mayor a la tasa de regeneración de su fuente.
- Para una fuente no renovable (combustible fósil, menas de minerales de alta pureza, aguas freáticas fósiles) la tasa de consumo sostenible no debe ser superior a la tasa que un recurso renovable utilizado de modo sostenible puede sustituirla. Por ejemplo, un tanque de petróleo se consumiría de modo sostenible si parte de los beneficios obtenidos del mismo se invirtiera sistemáticamente en parques eólicos, placas fotovoltaicas y plantaciones de árboles de manera que cuando el petróleo se haya agotado todavía este disponible un flujo equivalente de energía renovable.
- Para un contaminante, la tasa de emisión sostenible no debe ser mayor que la tasa con la que este contaminante puede ser reciclado, absorbido o neutralizado en su sumidero. Por ejemplo, las aguas residuales pueden verterse en una corriente de agua superficial, un lago o un acuífero subterráneo de modo sostenible a un ritmo no mayor al que las bacterias y otros organismos pueden absorber sus nutrientes sin desbordar y desestabilizar a su vez el ecosistema acuático.

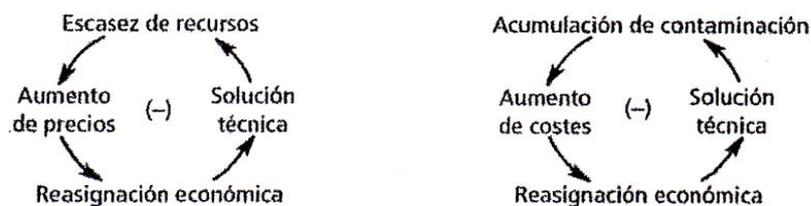


FIGURA 36. Ciclos de realimentación negativos

2.3.1. Fuentes renovables

1. Alimentos, tierra, suelo

Los cereales constituyen el 50% de la producción agrícola mundial, aunque gran parte se utilizan para alimentar animales, por lo que las hambrunas persisten, afectando sobre todo a mujeres y niños.

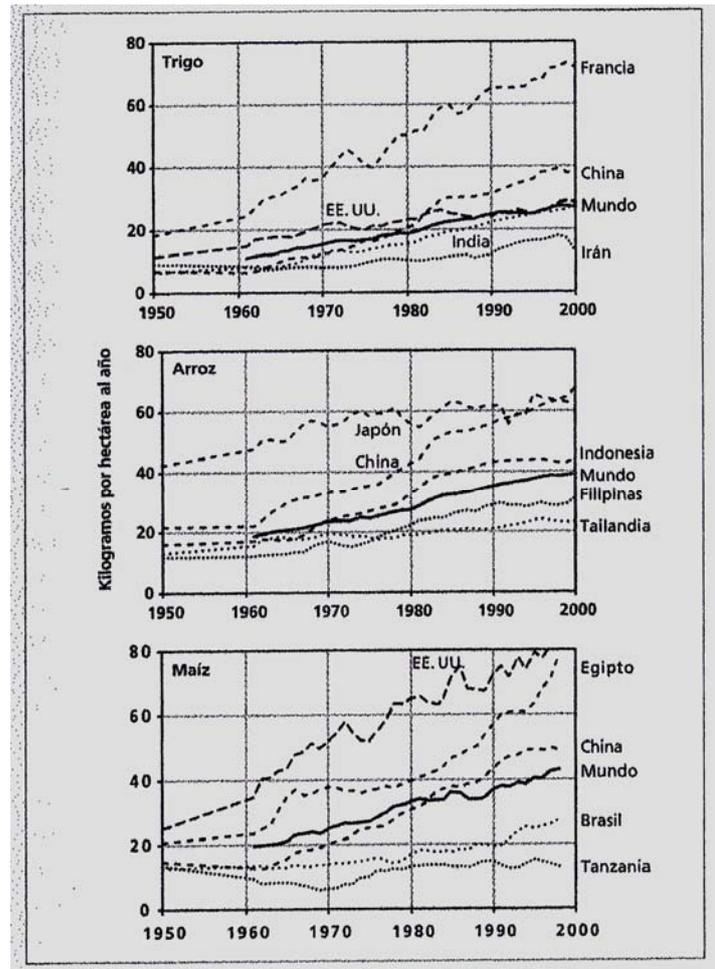


FIGURA 37. Rendimiento de la producción de cereales

Respecto al suelo, más de un tercio de la tierra agrícola explotada actualmente se ha degradado, al igual que un porcentaje de los pastos y de la superficie forestal. El grado de degradación es de moderado a grave, y además gran parte de la tierra agrícola se está empleando en urbanizar³⁶. Este proceso de erosión incide sobre dos tipos de fuentes, por un lado la calidad (profundidad, contenido de humus, fertilidad) de los suelos en las tierras de cultivo y por otro la propia tierra. La reserva de tierra potencialmente cultivable está disminuyendo al tiempo que crece la extensión de los eriales improductivos.

El flujo de alimentos que sostiene a la población humana se produce desplazando continuamente los cultivos a nuevos terrenos, dejando atrás suelos exhaustos, salados, erosionados o asfaltados. Ha sido posible seguir alimentando a una población creciente con menos hectáreas por persona porque se ha incrementado el rendimiento.

³⁶ Yakarta: se expande sobre tierras cultivables a un ritmo de 20.000 Ha/año; Vietnam: pierde 20.000 Ha/año de arrozales debido a la urbanización; Tailandia convirtió 34.000 Ha de terreno agrícola en campos de golf entre 1989 y 1994; China perdió 6.5 millones Ha entre 1987 y 1992, aunque en el mismo período convirtió 3.8 millones Ha de bosques y pastos en tierras de cultivo; EEUU: se asfaltan 170.000 Ha/año de terreno cultivable.

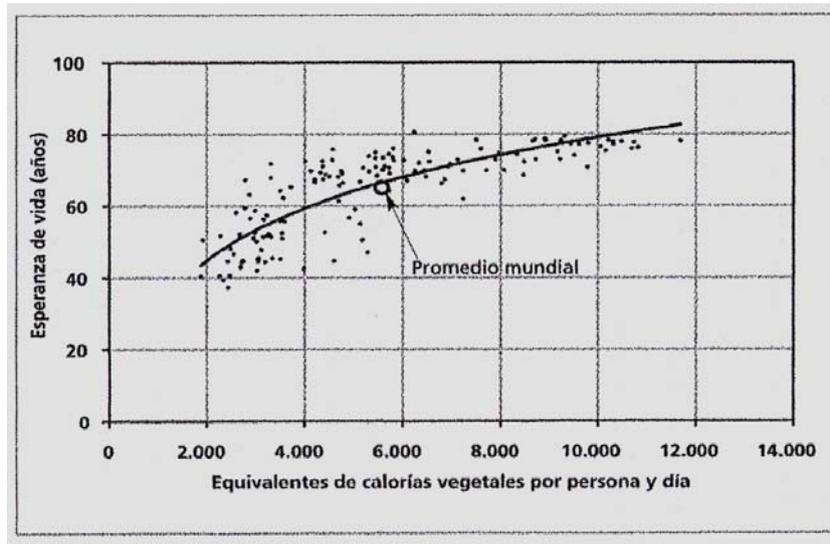


FIGURA 38. Alimentación y esperanza de vida

Es importante que se lleve a cabo un uso de forma sostenible del suelo, sin el empleo a gran escala de fertilizantes y plaguicidas.

Actualmente, en tierras de todo tipo, tanto en zonas templadas como tropicales, se obtienen altos rendimientos de forma sostenible (máquinas que ahorran mano de obra, sofisticados métodos ecológicos de abono y control de plagas, variedades de alto rendimiento...).

Por otro lado, los organismos modificados genéticamente plantean controversias, ya que originan cantidades de alimentos de alto coste.

Podemos afirmar que todo el mundo podría alimentarse de modo más que suficiente con el volumen de alimentos que se producen actualmente y sería posible producir todavía más, con mucha menos contaminación, en una superficie menor y utilizando menos energía fósil.

2. Agua dulce

El agua dulce no es un recurso mundial. Tiene carácter regional, pues está disponible en cuencas concretas, de modo que los límites adoptan diferentes formas: estacionales, ritmos de recuperación de los acuíferos, velocidad de fusión de la nieve...

Las limitaciones de agua restringen otros caudales necesarios, como los de alimentos, energía, peces y la flora y fauna silvestres, y además la extracción de otros caudales productivos (alimentos, minerales) puede limitar todavía más la cantidad o calidad del agua.

También la captación excesiva de aguas freáticas se está acelerando en todos los continentes salvo la Antártida.

Es también muy importante mejorar los índices de consumo de agua por habitante³⁷. Para ello, se podrían aplicar medidas como ajustar la calidad del agua a los distintos usos, utilizar el riego por goteo (reduce el consumo entre 30-70% e incrementa el rendimiento 20-90%), instalar grifos, cisternas y lavadores de caudal reducido, eliminar las fugas³⁸, plantar vegetales adaptados a cada clima, reciclar el agua (recaptar, depurar y reutilizar) o captar el agua de lluvia en zonas urbanas³⁹.

El precio del agua debe incorporar aunque solo fuera una parte del coste económico, social y ambiental total del suministro, y además incrementar la tarifa en función del consumo.

3. Bosques

Los bosques moderan el clima, controlan las riadas y almacenan el agua contra la sequía. También acolchan los efectos erosivos de la lluvia, acumulan y retienen el suelo en las laderas y mantienen libres de cieno los ríos y las costas marítimas, los canales de regadío y los pantanos.

Otra de sus características es que absorben y retienen gran cantidad de carbono, contribuyendo a equilibrar el nivel de carbono en la atmósfera y de este modo paliar el efecto invernadero y el calentamiento del planeta.

La pérdida de masa forestal es un problema por dos cuestiones. La primera, de índole cuantitativa, se refiere a la extensión de masa forestal desaparecida. Y otra de carácter cualitativo, que hace referencia a aquellos bosques vírgenes que nunca han sido talados y que en muchas ocasiones representan verdaderos pulmones verdes del planeta, como el caso del Amazonas⁴⁰.

Mientras que la extensión de los bosques en las zonas templadas no ha disminuido apreciablemente de 1990 a 2000, la deforestación tropical es imparable, y aunque las selvas tropicales crecen con mayor rapidez, también son más vulnerables, ya que no está claro si pueden sobrevivir a una sola tala o un incendio sin una grave degradación del suelo y del ecosistema. De hecho, actualmente la mayoría de las prácticas silvícolas tratan la selva tropical como un recurso no renovable.

Entre las causas de la deforestación: multinacionales madereras y papeleras, gobiernos que potencian las exportaciones para pagar la deuda externa, ganaderos/agricultores que convierten los bosques en tierras de cultivo o pasto, poblaciones sin tierra que buscan leña para quemar o una parcela de terreno para cultivar alimentos...

Como está desapareciendo la madera de alta calidad, también están apareciendo prácticas corruptas, como el tráfico clandestino de permisos de tala, la contabilidad fraudulenta o la falsificación de certificados sobre las especies.

Para mejorar el balance: reciclar papel, eficiencia de los aserraderos, eficiencia del combustible, uso eficiente del papel, repercusión del coste total en el precio, certificado verde⁴¹, ampliar plantaciones forestales de alto rendimiento en tierras ya rozadas o marginales, etc.

³⁷ EEUU: 1500 m³/persona*año; País en vías de desarrollo 500 m³; África subsahariana 150 m³

³⁸Una ciudad media de EEUU pierde alrededor del 25% del agua transportada en tubos debido a las fugas.

³⁹ Una cisterna o colector en el tejado permite acumular y utilizar tanta agua de escorrentía como una presa importante a mucho menor coste.

⁴⁰ EEUU: 95% de su superficie forestal original ha desaparecido (se descarta Alaska); China: 75% de sus bosques y casi todos sus bosques vírgenes desaparecidos.

⁴¹ Permite a los consumidores discernir los productos forestales elaborados con prácticas cuidadosas de tala y gestión de los bosques.

4. Especies y servicios del ecosistema

Son elementos que no habían sido tenidos en cuenta hasta ahora en el análisis de las fuentes renovables pero que sin ellos no puede plantearse la vida en la tierra tal y como nosotros la conocemos.

Algunos ejemplos podrían ser la depuración del agua y del aire, la absorción y el almacenamiento del agua, la descomposición, desintoxicación y secuestro de residuos, la regeneración de nutrientes del suelo, la polinización, el control de plagas, la diseminación de semillas y nutrientes, la moderación de vientos y temperaturas extremas, el abastecimiento de una gran variedad de productos agrícolas, farmacéuticos e industriales, la evolución y mantenimiento de la reserva de genes bióticos y de la biodiversidad o el aprendizaje de estrategias de supervivencia, resistencia, evolución y diversificación probadas durante 3000 millones de años.

Para medir la pérdida de estas especies y servicios se emplea el índice de número de especies y su tasa de extinción⁴². El problema es que no es tan fácil cuantificar ese número. Entre los datos contrastados están que el 30% de los arrecifes de coral de todo el mundo se encuentran en estado crítico o que el 50% de los humedales del mundo se han perdido por operaciones de dragado, terraplenado, drenaje y canalización.

Las tasas de extinción actualmente se estiman que son 1000 veces mayores que las que habría sin el impacto humano y que la población media de las especies ha disminuido más de 1/3 desde 1970.

2.3.2. Fuentes no renovables

1. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles una vez quemados, se transforman en CO₂, vapor agua, SO₂ y una serie de sustancias consideradas residuos y materias contaminantes que penetran en los sumideros planetarios, por lo que el problema inicial de las fuentes no renovables que era precisamente su finitud está desviándose hacia la capacidad de contaminación de los mismos.

De todos estos combustibles, el petróleo es el más limitado, y su producción mundial alcanzará el punto máximo en algún momento de la primera mitad del siglo XXI, a partir del cual comenzará el declinar de su producción. En ese intervalo de tiempo el consumo de energía primaria se incrementará muy apreciablemente (incremento de 2/3 del consumo mundial de energía primaria de 2000 a 2030), por lo que es imprescindible que la demanda de energía se base en combustibles menos contaminantes y a ser posibles procedentes de energías renovables.

Ya hemos dicho que actualmente la atención se centra más en el combustible fósil como sumidero (contaminante) que como fuente debido a su influencia en el cambio climático. Por ejemplo, la combustión del petróleo genera GEI y sin duda será el primero que se agote en la fuente. Ese agotamiento se manifestará a modo de un continuo descenso de la rentabilidad de la inversión en exploración, de creciente concentración de las reservas remanentes en unos pocos países y finalmente de declive gradual de la producción mundial total después de tocar techo.

El gas natural es un sustituto lógico del petróleo, ya que de todos los combustibles fósiles es el que

⁴² Existe una regla empírica que afirma que el 50% de las especies se conservan incluso si ha desaparecido el 90% del hábitat.

emite menos contaminación (incluido el GEI, CO₂) por unidad de energía. Al ser el más interesante, se acelerará el agotamiento de sus recursos.

Las mejoras en el consumo tienen que ir por el lado de la eficiencia y del empleo de energías alternativas como la eólica, fotovoltaica o el hidrógeno.

2. Materiales

El primer problema que nos encontramos en el uso de los materiales es el bajo porcentaje de reciclado de muchos de ellos. De hecho, el reciclado de la basura⁴³ solo abarca el extremo final y menos problemático del flujo de materiales.

La mejor manera de reducir estos flujos consiste en incrementar el período de vida útil de los productos y reducir los flujos de materiales en la fuente.

Si se duplica la vida útil media de cualquier producto se reducirá a la mitad el consumo de energía, la generación de residuos y la contaminación, así como el agotamiento final de los materiales utilizados para fabricarlos.

Para sacar conclusiones sobre la manera de minimizar la huella ecológica será preciso realizar siempre un exhaustivo ACV⁴⁴ del material analizado.

La reducción en la fuente implica encontrar la manera de realizar el mismo trabajo utilizando menos material. Es el equivalente a la eficiencia energética. Los avances actuales en nanotecnología y biotecnología permiten a la industria llevar a cabo reacciones químicas de la misma forma en que lo hace la naturaleza, ajustando cuidadosamente una molécula a otra.

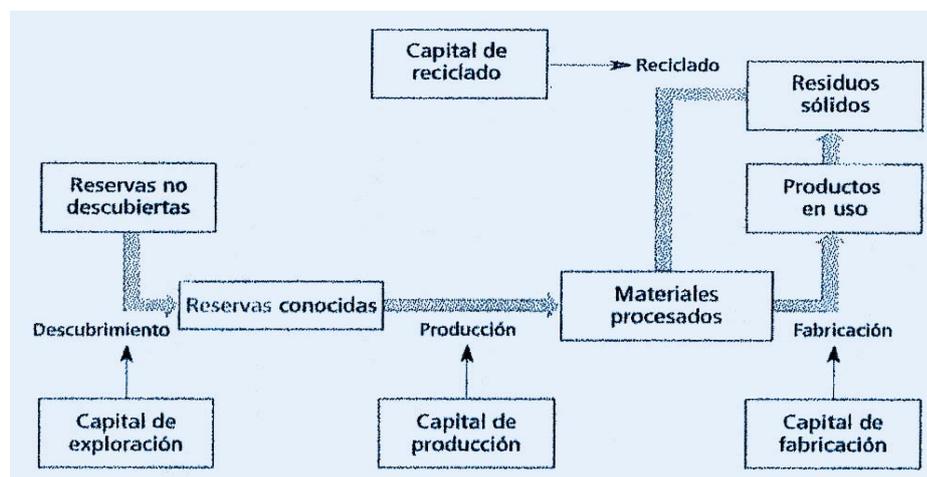


FIGURA 39. Reservas de reciclado desconocidas

⁴³ Una regla empírica dice que cada tonelada de basura en el extremo final del flujo ha implicado también la generación de 5 toneladas de residuos en la fase de fabricación y 20 toneladas de residuos en el lugar de extracción inicial del recurso (minas, pozos de bombeo, explotaciones agrícolas...).

⁴⁴ ACV: Análisis de Ciclo de Vida

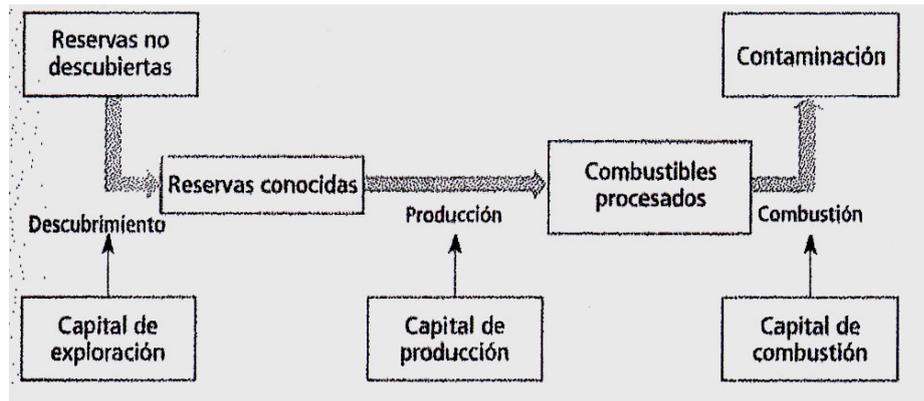


FIGURA 40. De reservas no descubiertas a contaminación

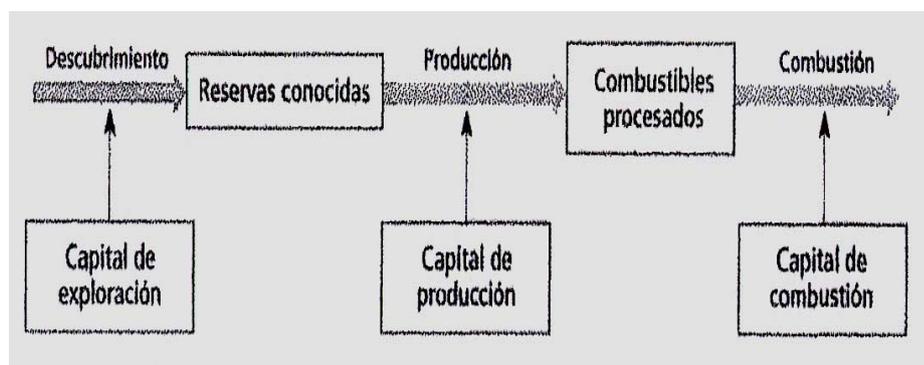


FIGURA 41. De reservas conocidas a combustibles procesados

2.3.3. Sumideros de contaminación y residuos

Debido al cambio climático mundial (efecto invernadero) el planeta se ha calentado 0.6 ± 0.2 °C desde 1860, siendo los dos últimos decenios los más cálidos del último siglo.

También se ha comprobado que el aumento de las temperaturas de la superficie a lo largo del siglo XX en el hemisferio norte es probablemente mayor que el que se haya producido en cualquier otro siglo del último milenio.

Otro efecto del cambio es que los patrones de precipitación están cambiando, con un incremento de los fenómenos de fuertes precipitaciones en algunas regiones.

También el nivel del mar se ve afectado por este cambio. Existen datos de que dicho nivel ha subido de 10 a 20 centímetros desde 1900, en parte porque la mayoría de los glaciares no polares se están contrayendo, y que la extensión y el grosor del hielo marino ártico está disminuyendo en verano.

Las responsables en gran medida del calentamiento observado en los últimos 50 años son las actividades humanas, que incrementan las concentraciones atmosféricas de GEI que calientan la atmósfera.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas publica

periódicamente informes sobre el estado de la temperatura del planeta. Algunos de sus últimos análisis los recogemos aquí:

- El calor atrapado incrementará la temperatura de la tierra por encima de lo que ésta aumentaría en ausencia de este factor.
- El calentamiento se distribuirá de forma desigual, siendo más acentuado en la proximidad de los polos que cerca del ecuador. Dado que el tiempo meteorológico y el clima de la Tierra se basan en gran medida en las diferencias de temperatura entre los polos y el ecuador, los vientos, las lluvias y las corrientes oceánicas experimentarían cambios de intensidad y dirección.
- En una tierra más caliente, el océano se expandirá y el nivel del mar subirá. Si el calor es suficiente para fundir grandes cantidades del hielo polar, el nivel del mar ascenderá significativamente, pero en un horizonte de tiempo más prolongado⁴⁵.

Para determinar un índice de cómo se ve afectado el planeta por la actividad humana empleamos el concepto del **impacto**, que nos da de forma empírica las causas del deterioro ambiental. Se expresa de la siguiente forma:

Impacto = población x abundancia x tecnología

Y expresado en palabras el impacto se define como la huella ecológica de toda la población en las fuentes y sumideros del planeta, y es igual al producto de su población (P) por su nivel de abundancia (A) y por el daño causado por las tecnologías (T) empleadas para sostener esta abundancia.

Para minimizar esa huella, cada región del planeta puede actuar de una determinada forma. El sur debería incidir sobre la población, buscando fórmulas para su control. Occidente debería atacar la cuestión de la abundancia y Europa Oriental debería mejorar sus procesos tecnológicos.

La abundancia viene determinada por un alto nivel de consumo; por ejemplo, el número de horas dedicadas a ver la TV, conducir un automóvil o descansar en una habitación. La huella ecológica de la abundancia es el impacto del caudal generado por el material, la energía y las emisiones asociadas a este consumo.

Por ejemplo, si uno bebe 3 tazas de café al día, la huella puede variar mucho en función de si utiliza tazas de porcelana o de plástico. Se requiere energía para extraer la arcilla para las tazas cerámicas, cocer la arcilla, suministrar las tazas a los hogares y calentar el agua para lavarlas. Se precisa energía para encontrar y bombear el petróleo para las tazas de poliestireno, transportar el petróleo, hacer funcionar la refinería, formar el polímero, moldear las tazas, suministrarlas y transportar las tazas usadas al vertedero.

En definitiva, habrá que buscar procesos más ecoeficientes, es decir, que obtengan mejores resultados y que impliquen menor uso de energía o material (y menos emisiones) por unidad de consumo.

⁴⁵ Más allá de los límites: " si todos los habitantes del planeta gozaran de los mismos niveles ecológicos que los norteamericanos, necesitaríamos tres planetas Tierra para satisfacer la demanda material agregada con la tecnología actual"

2.4. Modelo World3

El modelo World3 establece una metodología para conocer la dinámica del crecimiento en el mundo. Emplea la teoría de dinámica de sistemas desarrollada por Forrester y la actualiza para obtener resultados que tengan en cuenta las características del planeta en el tiempo presente.

Analizando el modelo previo que se empleó en los 70, su alcance se vio perjudicado por los avances tecnológicos producidos, sobre todo en cuestiones energéticas. Este nuevo modelo plantea escenarios donde la tecnología es uno de los factores relevantes para conseguir futuros más sostenibles para el hombre.

2.4.1. Objetivo y estructura de World3

El nuevo modelo establece una interrelación entre el mundo real (o sea la realidad o mejor dicho, la imagen mental que tenemos del mundo) y el mundo complejo de World3, en el cual se hace un seguimiento de magnitudes como la población, el capital industrial, la contaminación y la superficie de tierra cultivada, de las que ya se ha hecho un pequeño análisis en los apartados anteriores.

El modelo World3 incluye decenas de ciclos de realimentación, como corresponde a los sistemas dinámicos complejos.

También aparecen numerosas relaciones no lineales, las cuales producen comportamientos no intuitivos.

Un ejemplo de no linealidad sería la influencia de la cantidad de alimentos per cápita en la esperanza de vida humana. Si las personas insuficientemente alimentadas obtienen más alimentos, su esperanza de vida puede aumentar mucho. Las sociedades que han conseguido duplicar el consumo diario de alimentos (de 2000 a 4000 equivalentes de calorías vegetales por persona y día) pueden ver incrementada su esperanza de vida el 50% (40 a 60 años). Pero si se duplica de nuevo el consumo a 8000 el aumento de la esperanza de vida será quizás de 10 años más. E incluso puede llegar un momento en que un nuevo aumento del consumo de alimentos puede incluso reducir la esperanza de vida.

World3 se modela para comprender la amplia dinámica del futuro, o como las posibles modalidades o pautas de comportamiento a través de las cuales la economía humana interactuará con la capacidad de carga del planeta a lo largo del siglo que viene.

La capacidad de carga es un concepto dinámico, ya que cambia continuamente con la meteorología, el progreso tecnológico, las pautas de consumo, el clima y otros factores. Empleamos el término para designar el número de personas que en las circunstancias actuales podrían sostenerse en el planeta durante un largo espacio de tiempo (decenios) sin deteriorar la productividad global de la tierra.

La pregunta fundamental que World3 intenta responder es cómo van a interactuar la población mundial y la economía material en expansión con la capacidad de carga limitada de la tierra y adaptarse a ella en los próximos decenios.

La estructura del modelo se basa en el análisis de aspectos que ya han sido mencionados en apartados anteriores, como los procesos de crecimiento de determinadas variables de estado, los límites físicos del mundo real y del modelo y los desfases que ocurren en la percepción tanto de esos límites como de los procesos de erosión productos del crecimiento del planeta.

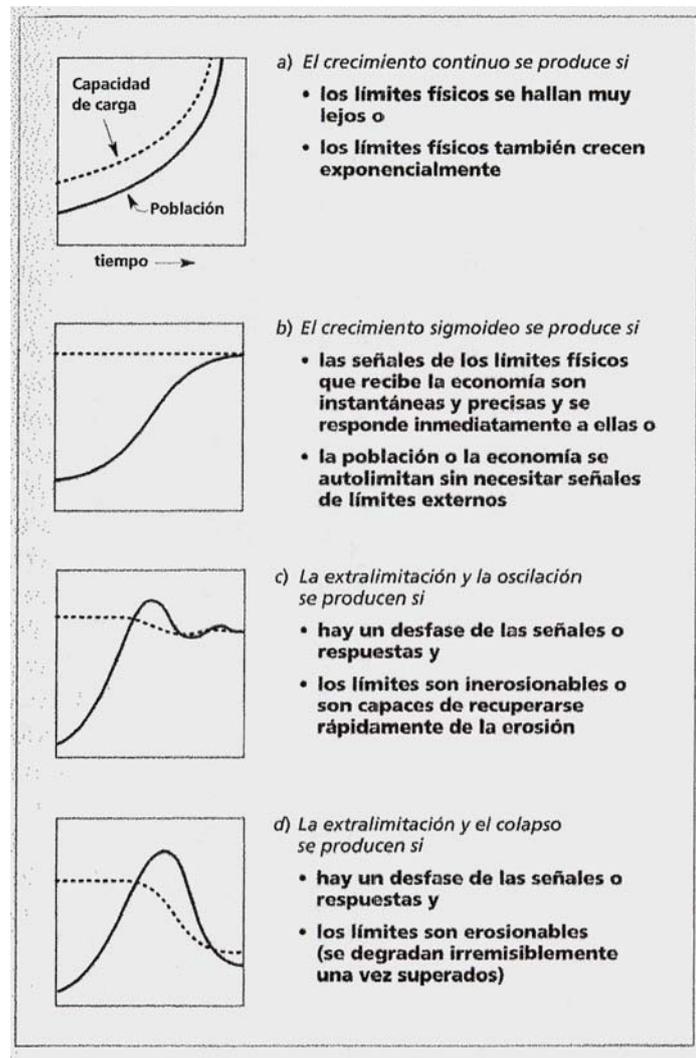


FIGURA 42. Posibles modalidades de aproximación de una población a su capacidad de carga

2.4.2. Los límites

Como ya hemos analizado anteriormente, las fuentes y los sumideros del planeta determinan la capacidad de carga del planeta. Para establecer cuantitativamente esos límites era necesario determinar indicadores que proporcionaran información sobre en qué situación se encontraban los límites del planeta. World3 establece los siguientes:

- Superficie cultivada de tierra utilizada para todas las formas de agricultura.
- Fertilidad de la tierra. Es la capacidad intrínseca del suelo para sostener el crecimiento vegetal y se ve reducida por la contaminación, principalmente por insumos agrícolas industriales.
- Rendimiento alcanzable en cada unidad de terreno. Aunque los insumos industriales (principalmente fertilizantes) incrementan el rendimiento, sus efectos son decrecientes, ya que a medida que aumentamos el consumo de fertilizantes el rendimiento crece cada vez menos.

- Recursos no renovables. Incluyen minerales, metales y combustibles fósiles. Se parte de la hipótesis de que la inversión necesaria para descubrir y extraer recursos no renovables aumenta en el tiempo.
- Capacidad del planeta para absorber la contaminación. Se trata del efecto neto de muchos procesos diferentes que secuestran o convierten los materiales tóxicos de larga vida, de manera que dejan de causar daño.

En el mundo real hay muchas otras clases de límites, incluidos los de tipo social. Algunos de ellos están implícitos en el modelo, otros como guerras, huelgas, terrorismo o criminalidad no se contemplan. Desde el punto de vista social, asumimos que la población se comporta de la mejor manera posible para solucionar los problemas de extralimitación que van surgiendo en los distintos escenarios.

World3 fija una serie de variables para determinar el estado del planeta y se agrupan en función de la información que proporcionan. Cada escenario establece once variables agrupadas en tres conjuntos:

1. Estado del mundo. Refleja los valores mundiales de los principales factores

- Población
- Producción de alimentos
- Producto industrial
- Nivel de contaminación relativo
- Reservas de recursos no renovables

2. Nivel de vida material. Lo componen:

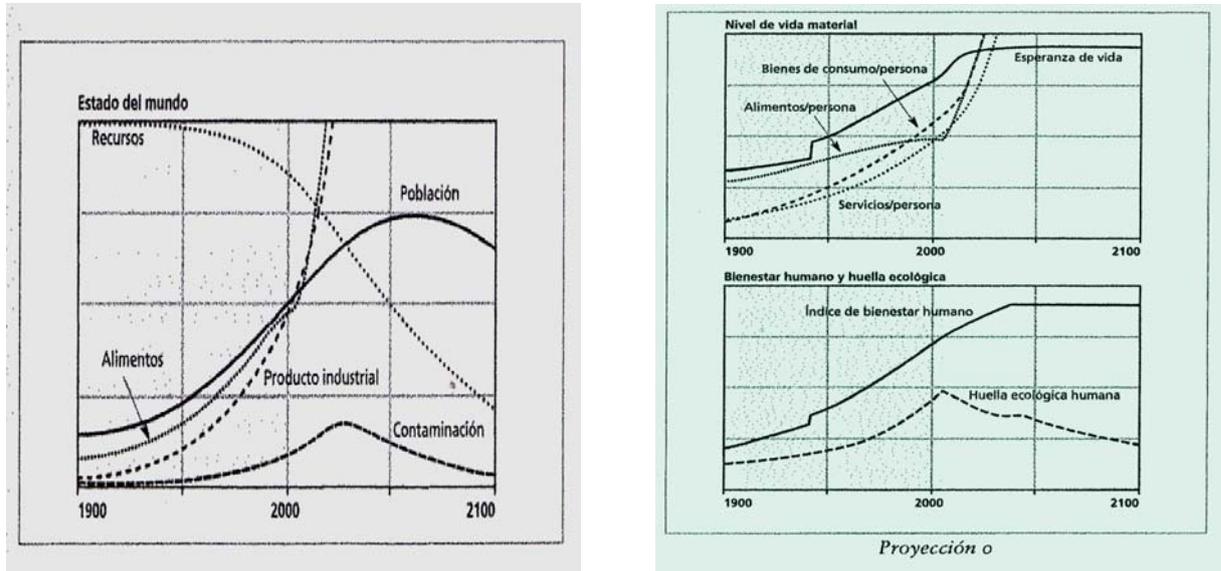
- Producción de alimentos por persona
- Servicios por persona
- Esperanza de vida media
- Bienes de consumo por persona

3. Bienestar humano y huella ecológica. Muestra los valores de dos indicadores mundiales

- Huella ecológica humana
- Índice de bienestar humano

Analicemos la primera proyección (**Proyección 0**) donde el escenario es irreal, ya que no se plantean límites al sistema.

FIGURA 43. PROYECCIÓN 0



Algunas de las consecuencias de ese escenario serían:

- La cantidad de recursos no renovables necesaria para fabricar una unidad de producto industrial cae exponencial e ilimitadamente un 5% cada año, disminuyendo un 50% cada 15 años mientras la sociedad se esfuerza por mejorar su eficiencia de uso de recursos.
- La cantidad de contaminación generada por unidad de producto industrial cae exponencial e ilimitadamente un 5% cada año.
- El rendimiento agrícola por unidad de producto industrial aumenta un 5% cada año, duplicándose cada 15 años mientras la sociedad se esfuerza por incrementar la producción de alimentos.
- Todos estos avances son efectivos en toda la economía mundial sin ningún coste de capital adicional y con un desfase de implementación de tan sólo 2 años.
- Los asentamientos humanos invaden tierras agrícolas a un ritmo equivalente al 25% del que normalmente se asume en World3 y los humanos no experimentan ningún efecto negativo de la superpoblación en su esperanza de vida.
- La contaminación ya no afecta adversamente a la producción agrícola
- La población reduce su ritmo de crecimiento, deja de crecer al alcanzar los 9000 millones de habitantes y después disminuye gradualmente pues el conjunto de la población mundial se enriquece suficientemente para experimentar la transición económica. La esperanza de vida se estabiliza en 80 años.

Este primer escenario no es real, porque la respuesta a los problemas que se plantean en el escenario 0 se resuelven inmediatamente.

Y uno de los aspectos fundamentales de los sistemas complejos es su mayor o menor índice de desfase entre la fecha en la que se observa un problema y la fecha en que todos los implicados se ponen de acuerdo.

Un ejemplo representativo podría ser el del PCB⁴⁶, un componente químico que se encontraba hasta los años 70 en condensadores, transformadores...

La mayoría son relativamente insolubles en agua, pero solubles en grasas y muy persistentes en el medio ambiente. Se desplazan rápidamente en la atmósfera y lentamente en los suelos o sedimentos de ríos y lagos hasta que se introducen en algún ser vivo, donde se acumulan en el tejido graso y aumentan su concentración a medida que ascienden en la cadena alimentaria.

Las concentraciones más altas se encuentran en peces carnívoros, aves, mamíferos marinos, grasa humana y leche materna. De hecho, un elevado consumo de pescado y mamíferos marinos es la vía principal de ingestión del PCB.

Su efecto principal es que actúan como disruptores endocrinos, imitando la acción de algunas hormonas, como el estrógeno, y bloqueando la acción de otras como las hormonas tiroideas. El resultado es que todos los animales con un sistema endocrino confunden delicadas señales que gobiernan el metabolismo y el comportamiento, y pueden afectar especialmente a los embriones, incluso en diminutas concentraciones. Además perduran mucho tiempo.

Aunque los PCB estaban prohibidos en muchos países desde la década de los 70, en 1989 se calculaba que el 30% de todos los PCB fabricados ya estaban liberados en el medio ambiente, del que tan solo el 1% había llegado a los océanos, mientras que el 29% restante estaba disperso en suelos, lagos... donde pasarían al organismo de criaturas vivas durante decenios.

Otros desfases aparecen en cuestiones relacionadas con la población y los recursos no renovables.

2.4.3. Extralimitación y oscilación

Si se retrasan las señales de advertencia de los límites a la entidad que crece, o si se retrasa la respuesta y el medioambiente no se erosiona con las tensiones excesivas, entonces la entidad que crece sobrepasará sus límites durante un tiempo, se corregirá y volverá al interior de los límites, para después extralimitarse de nuevo, en una serie de oscilaciones que normalmente se amortiguarán hasta alcanzar el equilibrio dentro de los límites (figura 42).

El punto importante es que en este modelo el sistema se regenera porque los límites son inerosionables o capaces de recuperarse rápidamente de la erosión.

Un ejemplo de este tipo de límites podrían ser los recursos renovables como bosques, suelos o peces, ya que son erosionables pero también tienen la capacidad de autorregenerarse. Así, en Noruega la

⁴⁶ PCB: policlorobifenilos

pesca de bajura vivió a finales del siglo XX un ciclo de agotamiento que obligó al gobierno a comprar y retirar buques pesqueros para que la población se regenerase.

La fase de declive de una extralimitación es un período duro para las industrias que dependen del recurso del que se ha abusado, o también para las poblaciones expuestas a altos niveles de contaminación, y aunque es preferible evitar las oscilaciones, no suelen ser fatales para el sistema.

Las extralimitaciones pueden resultar catastróficas si el daño que causan es irreversible, como sería el caso de especies extinguidas o combustibles fósiles agotados.

Si el clima se altera significativamente los datos geológicos indican que las pautas de temperatura y precipitaciones probablemente no volverán a la normalidad durante un tiempo relevante para la sociedad humana, incluso los recursos renovables y procesos de absorción de materias contaminantes pueden ser destruidos permanentemente a causa de un abuso prolongado y sistemático.

2.4.4. Extralimitación y colapso

Si la señal procedente del límite o la respuesta se retrasan y el medio ambiente se ve irremisiblemente erosionado debido al exceso de tensión, la economía en crecimiento sobrepasará su capacidad de carga, degradará su base de recursos y se colapsará (figura 42).

La diferencia respecto al caso anterior reside en la presencia de ciclos de erosión en el sistema. Se trata de los ciclos de realimentación positivos de la peor clase. Normalmente están latentes, pero cuando se deteriora una situación, la agravan arrastrando al sistema pendiente abajo a un ritmo cada vez mayor.

Algunos ejemplos:

- Si las personas tienen más hambre trabajan la tierra más intensamente, se producen más alimentos a corto plazo, pero a expensas de la inversión en mantenimiento del suelo a largo plazo. La pérdida de fertilidad del suelo provoca entonces que la producción de alimentos resulte menor que antes.
- Aparecen problemas como la contaminación que requieren más productos industriales. La inversión disponible se dedica a resolver el problema inmediato, en vez de mantener el capital industrial existente compensando la amortización. Si el capital comienza a disminuir, eso significa que en el futuro habrá aún menos productos disponibles.
- En una economía debilitada los servicios per cápita pueden verse mermados. Puede ocurrir que la reducción del gasto en planificación familiar aumente la tasa de natalidad, por lo que crece la población y se reducen aún más los servicios per cápita.
- Si los niveles de contaminación aumentan demasiado pueden erosionar los mecanismos de absorción de la contaminación, reduciendo así la tasa de asimilación de la contaminación. Por ejemplo, agentes contaminantes de corta vida como el CO destruyen un mecanismo de depuración del aire, por lo que agravan el problema del cambio climático a largo plazo, o la capacidad de los contaminantes atmosféricos para debilitar o matar los bosques, eliminando un sumidero de GEI.
- La acidificación de los suelos. Cuando los niveles de acidez son normales, los suelos absorben la contaminación, ya que se combinan con los metales tóxicos y los secuestran. En condiciones

de acidez estos enlaces se rompen, los metales se movilizan y se lixivian rápidamente en las aguas subterráneas y de superficie, o se absorben por las plantas.

A nivel local, la extralimitación y posterior colapso se manifiestan en el proceso de desertificación, el agotamiento de minerales y acuíferos, la intoxicación de suelos agrícolas o zonas boscosas a causa de residuos tóxicos de larga duración y la extinción de especies.

A escala mundial, dichos procesos podrían comportar la quiebra de los grandes ciclos de sostenimiento de la naturaleza que regulan el clima, purifican el aire y el agua, regeneran la biomasa, preservan la biodiversidad y convierten los residuos en nutrientes⁴⁷.

En el mundo simulado de World3 el objetivo primario es el crecimiento, lo que significa que la población solo dejará de crecer cuando sea muy rica y la economía sólo dejará de expandirse cuando choque con sus límites.

En la actualidad, los recursos disminuyen y se deterioran con la sobreexplotación, los ciclos de realimentación que articulan y determinan las decisiones encierran sustanciales desfases y los procesos políticos tienen una notable inercia, por lo que el modo de comportamiento más probable será la extralimitación y el colapso.

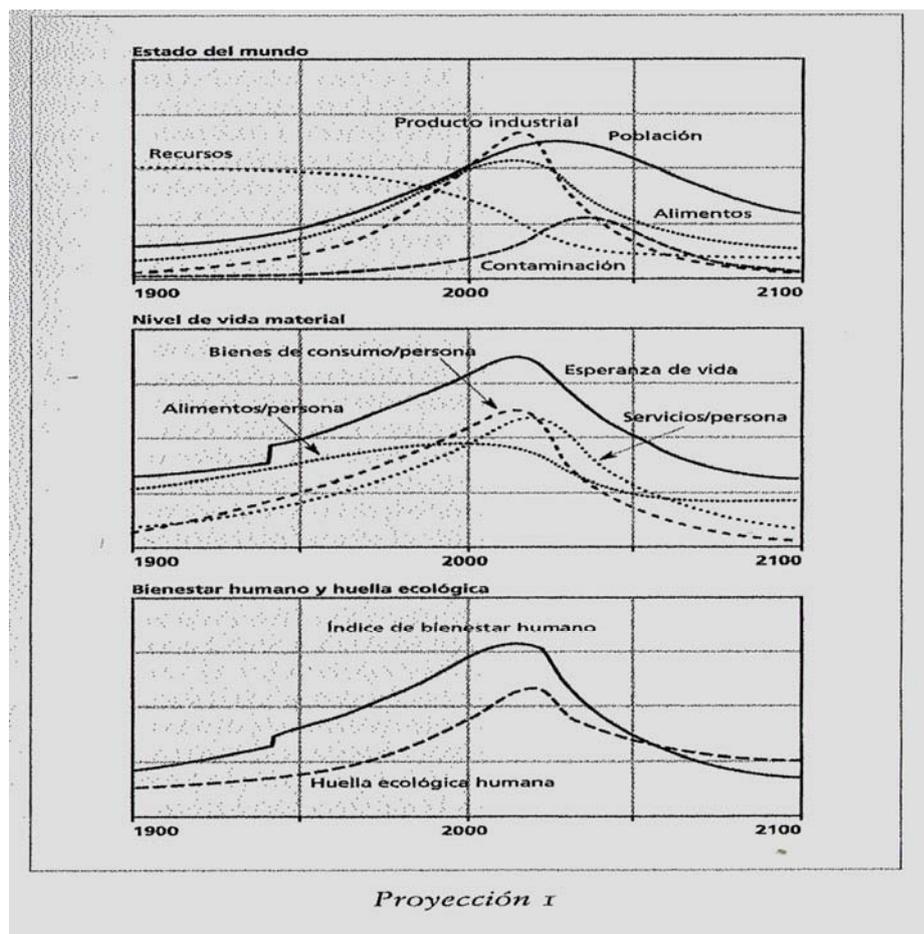


FIGURA 44. PROYECCIÓN 1

⁴⁷ Actualmente existen algunas investigaciones sobre el cambio planetario a escala mundial, como el Programa internacional Geosfera-Biosfera, el Programa Mundial de Investigación del Clima o el Programa internacional de Dimensiones Humanas.

La **proyección p1** retrata el comportamiento del sistema si la política que influye en el crecimiento de la economía y la población es similar a la que predominó en la última parte del siglo XX y si las tecnologías y valores siguen evolucionando de un modo representativo en dicho período y si los números del modelo resultan ser correctos.

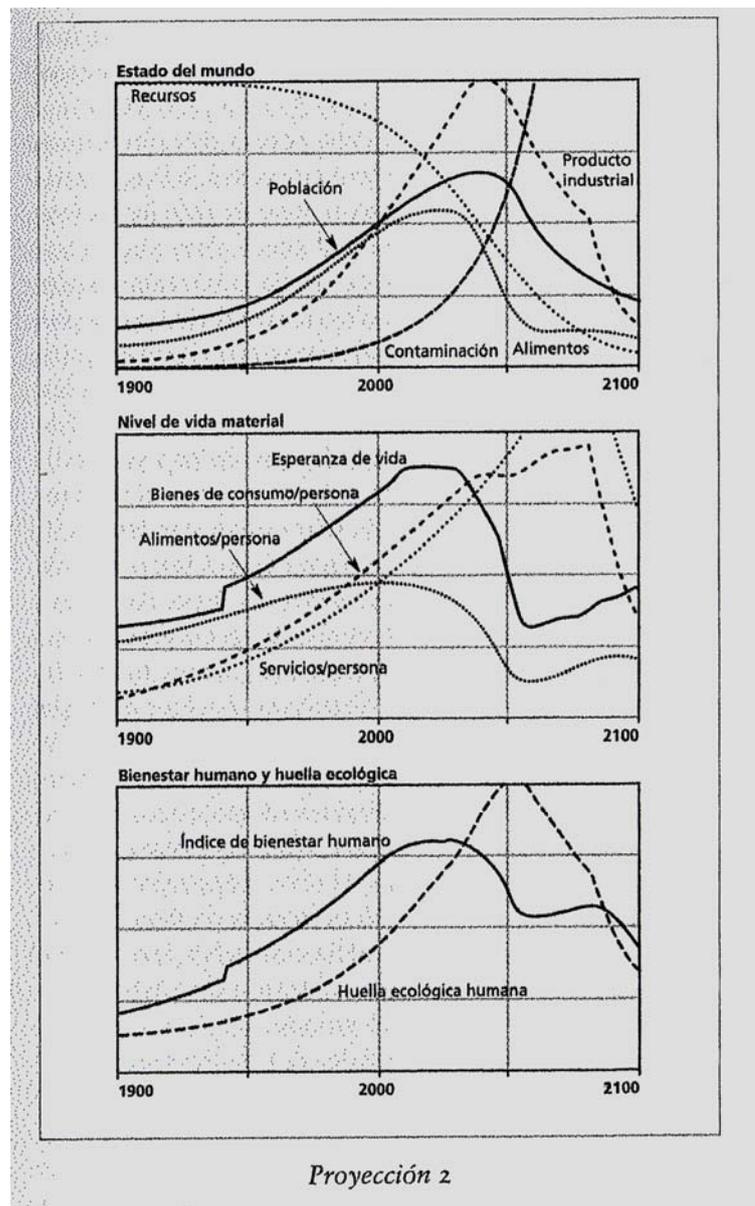


FIGURA 45. PROYECCIÓN 2

En la **proyección p2** planteamos un modelo similar aunque existe una mayor abundancia de recursos no renovables.

La humanidad se extralimita cuando la huella ecológica se sitúa por encima del nivel sostenible, pero todavía no es suficientemente grande para provocar cambios que comporten una contracción de su huella ecológica.

La extralimitación se deriva de los desfases de la realimentación, causados porque quienes toman las decisiones en el sistema no reciben de inmediato o no se creen la información (ni responden activamente a ella) de que se han sobrepasado los límites.

La extralimitación es posible porque hay existencias acumuladas de recursos que pueden aprovecharse.

La inercia física se suma al desfase de las señales de advertencia y constituyen otra fuente de demora en la respuesta. Debido al tiempo que necesitan los bosques para recuperarse, las poblaciones para envejecer, las aguas contaminadas para depurarse de nuevo....el sistema no puede cambiar de la noche a la mañana.

La otra causa de la extralimitación es la búsqueda del crecimiento. Los desfases de la realimentación son manejables en la medida en que el sistema no se mueva demasiado rápidamente para recibir las señales y responder antes de chocar con el límite.

Cuanto más rápido sea el crecimiento, tanto mayor será la extralimitación y más lejana la caída.

Lo que convierte la extralimitación en colapso es la erosión, ayudada por las relaciones no lineales. La erosión es una tensión que se automultiplica si no se le pone remedio rápidamente.

Las relaciones no lineales equivalen a umbrales, mas allá de los cuales cambia súbitamente el comportamiento del sistema. Por ejemplo, los suelos pueden degradarse sin afectar al rendimiento de los cultivos hasta que el suelo sea menos profundo que las raíces de las plantas. Entonces, la erosión ulterior conduce rápidamente a la desertización.

Todo sistema de población-economía-medio ambiente que adolece de desfases de realimentación y respuestas físicas lentas, que tiene umbrales y mecanismos de erosión, y que crece rápidamente es inmanejable en el sentido literal de la palabra.

Una sociedad puede determinar que se ha extralimitado cuando disminuyen las reservas de recursos y aumentan los niveles de contaminación.

Algunos otros síntomas pueden ser el capital desviado para compensar la pérdida de servicios que previamente prestaba la naturaleza sin coste alguno, el capital o los recursos desviados para la explotación de recursos cada vez más escasos, deterioro de los objetivos de salud y medio ambiente, proliferación de los conflictos, sobre todo en torno a fuentes o sumideros o el creciente caos en los sistemas naturales, con catástrofes naturales más frecuentes y graves debido a la pérdida de resistencia del sistema ambiental.

Para evitar el colapso quizás no sea necesario reducir la población, el capital o el nivel de vida, pero sí que habría que aminorar pronto los caudales de producción de materiales y energía⁴⁸ (reducir la huella ecológica).

Por fortuna hay tantos residuos e ineficiencias en la economía mundial actual que existe un enorme potencial para reducir la huella ecológica manteniendo al mismo tiempo e incluso incrementando la calidad de vida. También habría que mejorar las señales y acelerar las respuestas y prevenir la erosión y en los casos en que ya se produce frenarla y después invertir el proceso.

⁴⁸ Introducir el concepto de desmaterialización, es decir, un menor consumo de energía y materiales.

Como ejemplo paradigmático de que los procesos de extralimitación son reversibles encontramos la cuestión del ozono.

El caso del ozono

En el problema del ozono aparecen todos los pasos habituales en los procesos de extralimitación:

- Una etapa de crecimiento exponencial acompañada de la presencia de límites físicos erosionables.
- Una segunda etapa de señales de deterioro con sus correspondientes desfases físicos.
- Una tercera de extralimitación motivada por los desfases previos.
- Y una última de soluciones prácticas desfasadas en el tiempo.

La fase de crecimiento se origina por la introducción de los CFC⁴⁹ en una serie de materiales.

Los CFC son compuestos químicos muy estables, que permiten fabricar disolventes, aislantes y refrigerantes de altas prestaciones. No son costosos de fabricar y se eliminan con seguridad (eso se pensaba antes) simplemente liberándolos en forma de gas a la atmósfera o en vertedero.

El límite físico es la capa de ozono, una especie de velo que impide que penetre una radiación ultravioleta especialmente dañina, la radiación UVB de la luz solar incidente. La UVB consigue disociar moléculas orgánicas (aquellas que conforman la vida), y cuando un organismo vivo recibe un rayo UVB un posible efecto posterior es la aparición del cáncer.

Los CFC son responsables de la destrucción del ozono troposférico, pero ese proceso conlleva una serie de desfases físicos, entre ellos la continua regeneración del cloro o la síntesis industrial de cada molécula de CFC y su llegada a la estratosfera.

El consenso científico para considerar que el efecto de los CFC era dañino para el medio ambiente y que se estaba en la fase de extralimitación se produce cuando se descubre que el responsable del agujero de la capa de ozono es el Cloro de los CFC (1987⁵⁰).

Como los gases presentes en la atmósfera se mezclan, la concentración de ozono en la estratosfera disminuye en todo el planeta. Debido a la larga vida de los CFC y del Cloro en la atmósfera, el proceso de reducción del ozono perdurará mucho tiempo, por lo menos un siglo.

La respuesta a esta extralimitación se caracteriza por los desfases en la práctica. Desde 1985 hasta 1987 no se aprueban medidas contra el empleo de los CFC.

Será el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) quién reunirá las evidencias y se debatirán en el Protocolo de Montreal de 1987. Ahí se establecen las primeras medidas de control:

⁴⁹ Clorofluorocarbonos

⁵⁰ En Octubre de 1984 se realizan mediciones en la Antártida donde se observa un descenso de la concentración de ozono en la estratosfera del 50%.

- Producción de CFC congelada en los niveles de 1986.
- Reducción de la producción durante los siguientes años.

Pese a los recortes de producción, las grandes reservas de CFC que se habían fabricado pero todavía no se habían liberado y las que se habían liberado pero no habían alcanzado la estratosfera habrían seguido incrementando la concentración de Cloro. Además, los países en vías de industrialización no habían firmado el protocolo. En 1989 EE.UU. y la Unión Europea acuerdan poner fin a la producción de los cinco CFC más importantes para el año 2000. Dicho acuerdo es ratificado por 92 países en el Acuerdo de Londres de 1990.

Pero en la primavera de 1991 nuevas mediciones revelan que la reducción de la capa de ozono avanza dos veces más rápido de lo previsto. Países como Alemania deciden anular la producción de CFC incluso antes de lo estipulado en el Acuerdo de Londres. Los países en vías de desarrollo deciden seguir el mismo calendario de reducción que los países industrializados. Se fija que toda la producción cese en la fecha límite de 2010. En el protocolo de Copenhague de 1992 se adelanta el cese al año 1996, y en Montreal 1997 se hacen pequeños ajustes al acuerdo de 1992. Los CFC se sustituyen por los llamados HCFC⁵¹, menos dañinos para la atmósfera.

Los datos disponibles en el año 2000 revelan que la producción mundial de gases CFC ha descendido del máximo de 1988 (1 millón de toneladas) a 100.000 toneladas. Dado que los CFC también son GEI, varios miles de veces más potentes que el CO₂, el cese de su producción también reduce el ritmo del cambio climático.

Aunque el crecimiento del agujero de ozono fue desacelerándose progresivamente, en 2002 la Evaluación Científica de la Organización Mundial Medioambiental no estaba en disposición de decir si la extensión del agujero de ozono (antártico) había alcanzado su punto máximo, si bien admitió que la capa de ozono se recuperará lentamente durante los próximos 50 años.

También se han buscado soluciones desde el ámbito de la innovación tecnológica.

En primer lugar, se están investigando mejoras técnicas que eviten la necesidad de emplear este tipo de gases, por ejemplo mejorando el aislamiento para reducir las necesidades de refrigeración.

También reciclando las sustancias químicas que lo emplean. Actualmente se están empleando sustitutos de los CFC, los HCFC, que sólo son de 2 al 20% de destructivos para la capa de ozono respecto a lo que lo son los CFC, y su eliminación se prevé para 2030. Otras alternativas son disolventes a partir de soluciones acuosas, rotación de cultivos para evitar usar pesticidas con CFC...

En la historia del ozono podemos ver todos los ingredientes de un sistema de extralimitación y colapso: crecimiento exponencial, límite ambiental erosionable y largos desfases de la respuesta, tanto física como política.

Pasaron 13 años desde las primeras advertencias científicas en 1974 hasta la firma del Protocolo en 1987 y otros 13 desde la primera firma hasta el vencimiento del plazo de plena aplicación del protocolo reforzado.

Hará falta más de 1 siglo para eliminar totalmente el cloro de la estratosfera después de 2050.

⁵¹ CFC hidrogenados

Las conclusiones que podemos sacar del problema del ozono y de la cuestión de la extralimitación es que los acuerdos internacionales para evitar futuros daños en el medio ambiente exigen normalmente tanto instrumentos como voluntad para realizar proyecciones a largo plazo, que debe existir cooperación científica mundial, un sistema de información global, que se puede reaccionar con rapidez pero no de forma instantánea y que las predicciones alarmistas de la industria sobre las consecuencias económicas del cumplimiento de la normativa ambiental pueden ser exagerados, ya que se subestima el progreso tecnológico.

2.5. Tecnología y mercados

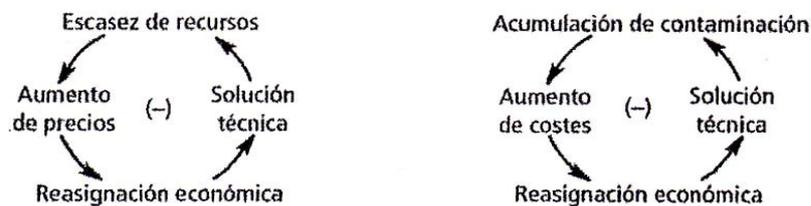


FIGURA 46. Ciclos de realimentación negativos

Según la figura de ciclos de realimentación, el mercado es necesario para señalar el problema, destinar recursos a resolverlo y seleccionar y premiar la mejor solución, y la tecnología es necesaria para resolver el problema.

La necesidad de las tecnologías incorporadas en el modelo se señala perfectamente y sin desfase al sector del capital. Para representar el mecanismo (la escasez genera una respuesta técnica) se omite la mediación de un precio, lo que evita los desfases e imprecisiones que ocurren en los sistemas de mercado reales.

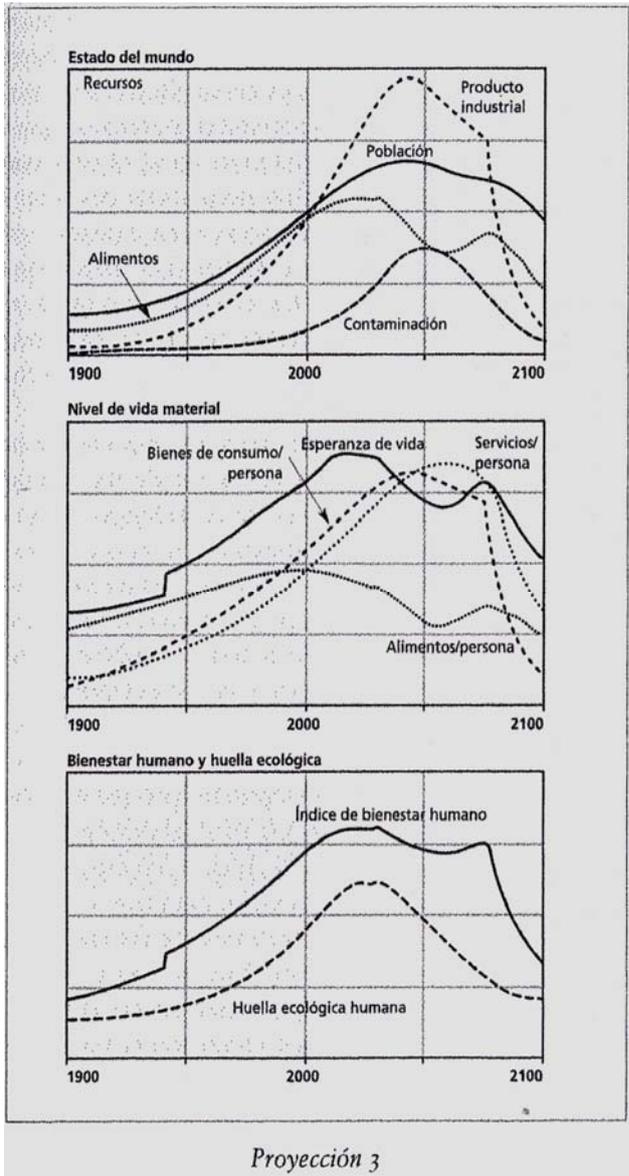


FIGURA 47. PROYECCIÓN 3

EFECTO DE LA TECNOLOGÍA EN LAS EMISIONES DE CONTAMINACIÓN PERSISTENTE EN WORLD3	
Año	Reducción porcentual
2000	0 %
2020	10 %
2040	48 %
2060	75 %
2080	89 %
2100	95 %

FIGURA 48. Efecto de la tecnología en las emisiones de contaminación persistente en World3

En este apartado se analizará como la tecnología es capaz de estirar los límites.

En la **proyección 3** se plantea una tecnología de control de la contaminación. Se considera la hipótesis de que la tecnología mejora a un 4% anual, por lo que se necesitan 20 años en promedio para que una nueva capacidad se disemine universalmente del laboratorio a la reserva de capital de producción a escala mundial.

En el año simulado de 2002, antes que el nivel de contaminación mundial haya subido tanto como para causar un daño importante en la salud o los cultivos, el mundo decide reducir la contaminación a los niveles existentes en los 70 y asigna sistemáticamente capital a la consecución del objetivo.

Las emisiones disminuyen con los aumentos asociados del coste de inversión del capital del 20%. La contaminación sigue aumentando durante casi 50 años a pesar del programa de eliminación, tanto

debido a los desfases de la implementación como a la continuidad del crecimiento subyacente de la producción industrial.

La sociedad de esta proyección reduce en gran medida su nivel de contaminación y logra mantener un alto IBH durante largo tiempo, pero al final la alimentación se convierte en un problema (crisis de alimentación).

En la **proyección 4** se incorpora una combinación de tecnologías. Por una parte, una de control de la contaminación y por otra una de aumento del rendimiento de la tierra (un aumento de la producción de alimentos).

En esta proyección al final se produce una crisis en el sistema por la erosión del suelo (crisis de erosión del suelo).

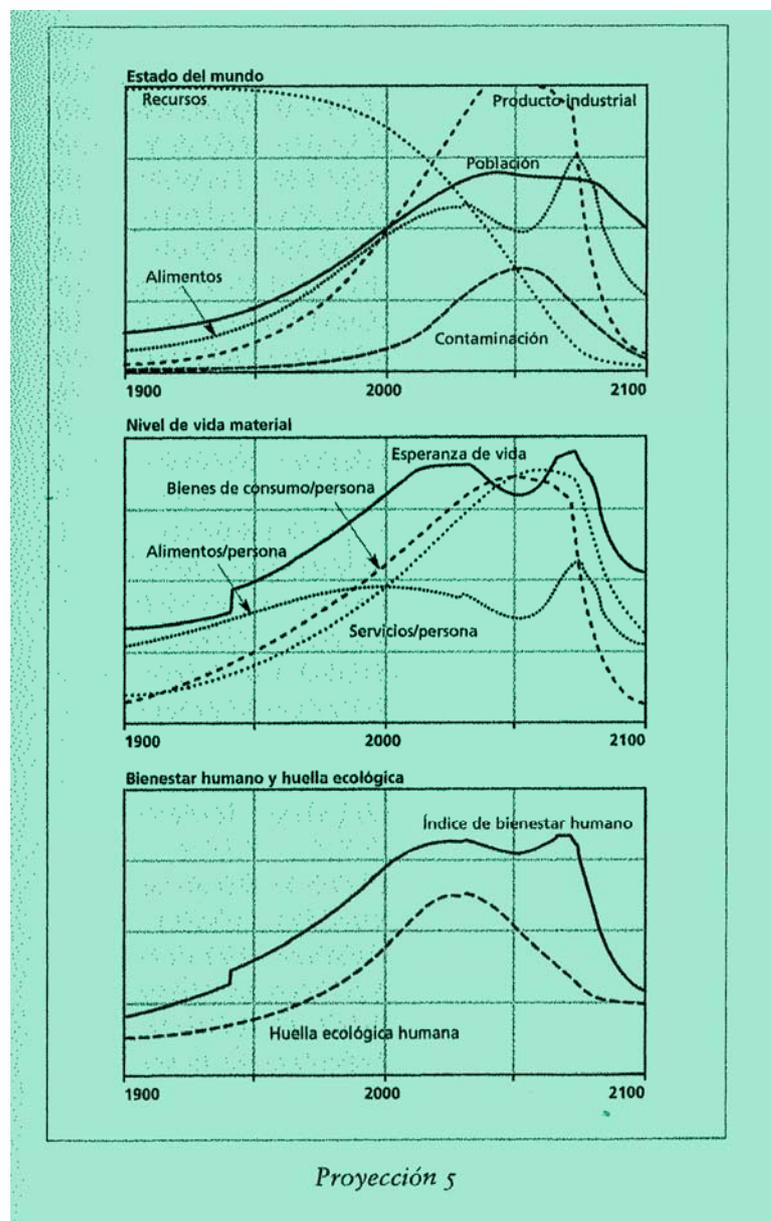


FIGURA 49. PROYECCIÓN 5

Proyección 5: En este escenario se disponen de tres nuevos avances tecnológicos, los correspondientes a p3 y p4 y una nueva tecnología para proteger el suelo contra la erosión.

No se requiere inversión de capital adicional, sino el uso de técnicas de cultivo más cuidadosas para alargar la vida productiva del suelo.

Este programa no tiene efectos significativos hasta después de 2050, cuando las tasas de erosión de la tierra se reducen drásticamente a raíz de mejoras en las técnicas de cultivo.

El resultado permite alargar ligeramente el periodo de elevado bienestar humano después de 2070, pero el resultado no es sostenible, y la p5 desemboca en un colapso causado por la combinación de sendas crisis de recursos, alimentos y elevados costes, más o menos simultáneas. Hasta alrededor de 2070, el bienestar humano es elevado. Después de esta fecha, el coste de las diversas tecnologías, más el coste creciente de la extracción de recursos no renovables de yacimientos cada vez más agotados reclaman más capital que el que puede aportar la economía.

El resultado es un declive bastante abrupto (crisis de recursos).

Proyección 6⁵²: Escenario similar al p5 al que ahora se le añade tecnologías de ahorro de recursos (eficiencia energética).

La población no disminuye, pero la esperanza de vida desciende en 2050. Al mismo tiempo la producción de alimentos es baja, efecto que se subsana finalmente mediante el incremento del rendimiento agrícola y las tecnologías de reducción de la contaminación. Los recursos no renovables se agotan menos rápidamente y su coste se mantiene bajo.

Al final del un siglo XXI fluctuante, una población estable de 8000 millones habita un mundo de alta tecnología y escasa contaminación, con un IBH equivalente al del año 2000. La esperanza de vida y la cantidad de alimentos per cápita son más altas, la disponibilidad de servicios es la misma pero la de bienes de consumo per cápita es menor.

El producto industrial comienza a disminuir debido a que el aumento del gasto destinado a proteger a la población del hambre, la contaminación, la erosión y la escasez de recursos recortan el capital disponible para el crecimiento (crisis de costes).

El mundo simulado resulta incapaz de sostener su nivel de vida a medida que la tecnología, los servicios sociales y las nuevas inversiones devienen simultáneamente demasiado costosos.

Como recordatorio, indicar una serie de simplificaciones que hace el modelo:

- No distingue entre las partes ricas y pobres del mundo.
- Todas las señales de hambre, escasez de recursos y contaminación se suponen que llegan al mundo en su conjunto y que suscitan respuestas que se basan en las capacidades de

⁵² No se representa el escenario p6 porque es muy similar al p5

adaptación del mundo en su conjunto.

- Las decisiones políticas adoptadas para establecer determinadas tecnologías se realizan sin coste alguno y sin retraso.
- No se incluye en el modelo el sector militar, que absorbe capital y recursos de la economía productiva.
- No incluye conflictos de ningún tipo.

Con los últimos ejemplos, hemos constatado que la tecnología y los mercados no pueden evitar la extralimitación por sí solos.

En todos los casos anteriores, la huella ecológica tiende a crecer por encima de su límite sostenible y esto a su vez provoca una reducción forzosa de la huella. Es igualmente cierto que es posible reducir la huella mediante el desarrollo y uso de tecnologías que aminoran el volumen de materiales y energía que requieren la industria y la agricultura. Es lo que se denomina la desmaterialización de la economía mundial.

Una sociedad que consigue desplazar sus límites mediante adaptaciones económicas y técnicas es muy probable que se tope con varios de ellos al mismo tiempo. Al final el sistema agota su capacidad de dar abasto, representada por el volumen de producto industrial disponible cada año para invertirlo en la solución de problemas.

Cuando los problemas surgen exponencialmente y de forma múltiple, aunque en teoría surgen de uno en uno, en su conjunto pueden superar la capacidad para dar abasto. El tiempo es de hecho el límite definitivo, y el crecimiento exponencial acorta el tiempo disponible para actuar efectivamente

Además, los mercados y las tecnologías son meros instrumentos que sirven a los objetivos, la ética y el horizonte temporal de la sociedad en su conjunto.

Si los objetivos implícitos de la sociedad consisten en explotar la naturaleza y enriquecer a las élites, esa sociedad desarrollará tecnologías y mercados que destruyan el medio ambiente, ensanchen la distancia entre pobres y ricos y optimicen las ganancias a corto plazo, acelerándose el colapso.

Así, aunque la idea de la globalización económica se vende como la tabla de salvación para los países en vías de desarrollo, en realidad es otro sistema que tiene el mercado para mantener los privilegios consolidados.

Ya en 1890, en Gran Bretaña se afirmaba de forma premonitoria la idea que tenían las metrópolis respecto a sus feudos en la época del colonialismo: "Las colonias proporcionarán un vertedero para el excedente de productos producidos en nuestras fábricas".

El sistema capitalista actual se fragua al finalizar la Segunda Guerra Mundial, cuando los vencedores elaboran en las reuniones de Bretton Woods (junio de 1944) un nuevo reglamento para la economía mundial.

Esta estructura financiera de la posguerra incluía al Banco Mundial⁵³, el Fondo Monetario Internacional

⁵³ FMI: supervisión de un sistema de tipos de cambio fijos. Entidad crediticia de último recurso; Banco Mundial: facilita créditos blandos con interés bajo a los países más pobres; GATT/Organización Mundial del Comercio (OMC).

(FMI) y el Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT), además de optar por un sistema basado en el movimiento libre de mercancías con el dólar como moneda internacional, que permitió a EEUU convertirse en la primera potencia económica mundial.

Posteriormente, el sistema se liberaliza de forma total con los gobiernos de principios de los 80 de Ronald Reagan y Margaret Thatcher.

Y el sistema económico actual en su búsqueda desenfrenada del crecimiento sigue perpetuando aquellos modelos del colonialismo y permitiendo las desigualdades que causan la extralimitación.

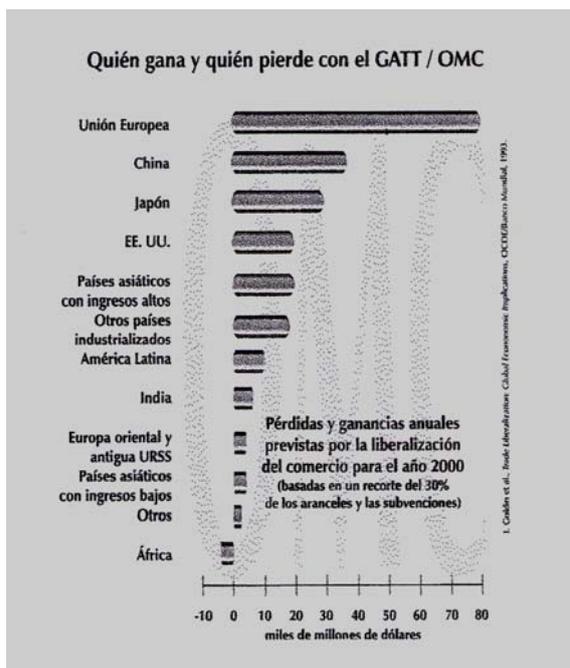


FIGURA 50. Quién gana y quién pierde con el GATT/OMC



FIGURA 51. La montaña de la deuda

Los costes ya mencionados de la tecnología y el mercado se cuentan en recursos, energía, dinero, mano de obra y capital, que crecen de modo no lineal cuando se está cerca de los límites. El crecimiento lleva a una economía por la pendiente ascendente de una curva de coste hasta el punto en que toda reducción ulterior de la contaminación resulta inasequible.

Y es que al igual que otros aspectos de la dinámica mundial, la tecnología y el mercado operan mediante ciclos de realimentación que encierran distorsiones de la información y desfases, y son a su vez fuentes de extralimitación, fluctuación e inestabilidad.

Un ejemplo de imperfección del mercado lo representan las oscilaciones del petróleo.

El caso del petróleo

En los 70 la crisis del petróleo origina una escalada del precio del crudo. Los consumidores responden a esta alza de precios con medidas de ahorro. También los gobiernos ordenan formas de ahorro de energía y promueven el desarrollo de fuentes de energía alternativas, aunque se tardarán más de 10 años hasta que las numerosas respuestas comiencen finalmente a reequilibrar la oferta y la demanda, con una tasa de consumo más baja en consonancia con el mayor precio del petróleo.

En 1983 el consumo de petróleo había descendido un 12% respecto al máximo de 1979, y como todavía había exceso de producción la OPEP⁵⁴ tuvo que reducir más su capacidad de bombeo hasta casi un 50%. El precio mundial descendió lentamente hasta caer en picado en 1985, antes de seguir su tendencia a la baja hasta finales de la década de 90. Como el precio bajó mucho, todas las medidas de ahorro se abandonaron, apareció un nuevo desequilibrio y el consiguiente aumento del precio hasta llegar a la actualidad.

Estas extralimitaciones se debieron a los inevitables desfases de la respuesta del mercado, todo por el intento de ajustar los volúmenes relativos del capital de producción y del capital de consumo de petróleo, en ningún momento motivadas por la cantidad de crudo realmente existente en el subsuelo (que disminuye de modo constante) o con los efectos ambientales de la perforación, transporte, refinado y combustión.

La conclusión de este proceso es que el mercado no ve a largo plazo y no presta atención a las fuentes y sumideros últimos hasta que están casi agotados.

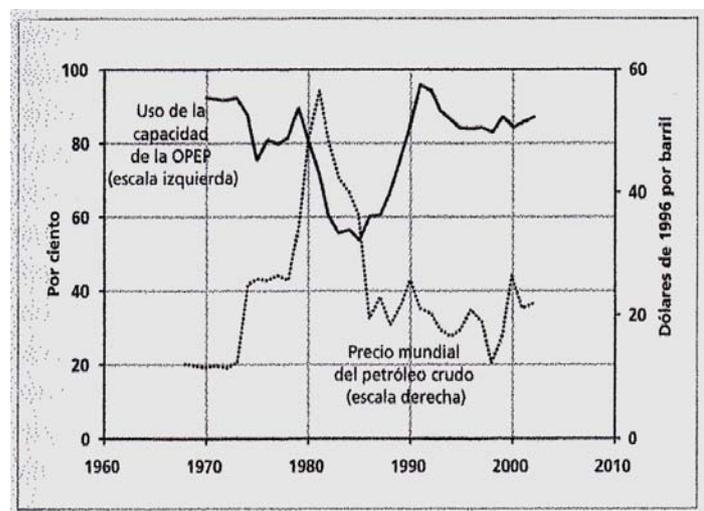


FIGURA 52. Producción de petróleo

También el mercado y la tecnología han sido responsables de la destrucción de caladeros de peces.

⁵⁴ OPEP: Organización de Países Exportadores de Petróleo. Organización creada en la Conferencia de Bagdad de 1960 que agrupa a los países productores de petróleo y cuyo objetivo es la consecución de los mejores precios de venta para los productos petroleros de los países miembros. El total de países de la OPEP computa el 39,4% de la producción de petróleo mundial y más del 77% de las reservas del planeta.

Los caladeros de peces

En este caso entran en juego la combinación normal de negación de los límites, el aumento de esfuerzos por mantener los volúmenes de captura tradicionales, la expulsión de pescadores extranjeros, los subsidios a los pescadores locales y finalmente una reglamentación vacilante.

La era de los mares abiertos ha llegado a su fin. Debido a la escasez de recursos y la reglamentación, el total mundial de capturas de peces salvajes ha dejado de crecer.

La solución aparente está en las piscifactorías, pero existen importantes puntos negativos en ellas. Por una parte la piscicultura no es una fuente de alimentación neta, sino que convierte una forma de alimento en otra, ya que los peces de las piscifactorías se alimentan con cereales o harina de pescado. Antes el pescado solía ser fuente de alimentación para los pobres, disponible a escala local y con un coste financiero reducido. En cambio, la piscicultura es una actividad que sirve a los mercados en la que los beneficios son máximos. Y por último, el cultivo de peces, gambas y otras especies causa graves daños ambientales, ya que la huida de especies cultivadas al océano, la diseminación de residuos de alimentos y antibióticos a las aguas marinas, la propagación de virus y la destrucción de los humedales costeros son otras secuelas de esta tecnología.

Según datos de la FAO de 2002, el 75% de los caladeros oceánicos están agotados.

Se ha constatado que las poblaciones de atún rojo, un pez que vive 30 años y llega a los 700 Kg., decayeron un 94% en los 20 años que median entre 1970 y 1990. Aunque también se han establecido moratorias en algunos países como Noruega (de 10 años) que han permitido recuperar las pescas autóctonas del arenque y bacalao.

En vez de proteger y reforzar las poblaciones de peces, el tipo de tecnología que se emplea actualmente aspira a capturar hasta el último pez. Además si el mercado da señales de escasez incrementando el precio del pescado, la población más rica estará dispuesta a pagar el precio. En Tokio, a comienzos de la década de 1990 el atún rojo costaba hasta 100 dólares la libra en el mercado de sushi. Por un efecto perverso, estos precios elevados estimulan la intensificación del esfuerzo pesquero de las empresas de pesca, mientras la población de peces sigue en vías de agotarse.

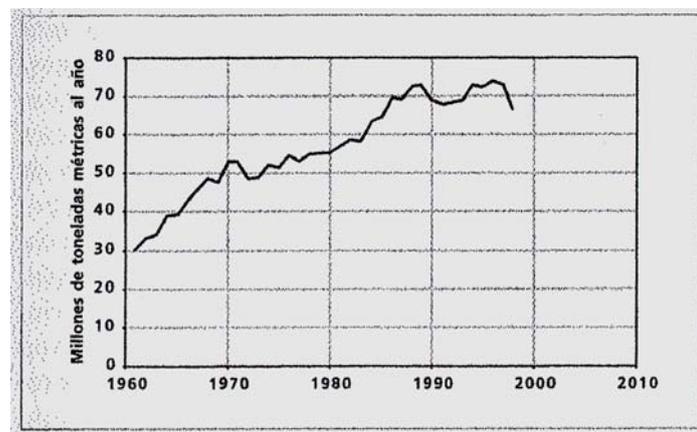


FIGURA 53. Captura mundial de peces salvajes

Un sistema de mercado desregulado que rige un recurso común con una lenta tasa de regeneración conduce inevitablemente a la extralimitación y la destrucción de los víveres. Sólo mediante imperativos políticos de algún tipo será posible proteger el recurso.

En resumen, el crecimiento exponencial puede superar rápidamente cualquier límite fijado. Si se desplaza un límite, el crecimiento exponencial chocará pronto con otro límite.

Es claramente visible que la extralimitación es un hecho en muchas fuentes y sumideros.

Y que la tecnología y los mercados operan únicamente a partir de informaciones imperfectas y con retraso, y generan crecimiento mientras pueden.

Si sus objetivos primarios fueran la igualdad y la sostenibilidad, también podrían servir a estos objetivos.

2.6. Transición hacia el equilibrio

Las políticas puestas en marcha por la mayoría de los países desarrollados para evitar el problema del colapso han sido trasladar los costes de la extralimitación a quienes se hallan muy lejos en el espacio y en el tiempo y aliviar las presiones de los límites a base de recetas tecnológicas o económicas, cuando la solución real se halla en buscar un cambio en la estructura del sistema.

Para ello es necesario cambiar la estructura de realimentación, los vínculos de información dentro de un sistema, es decir, el contenido y la actualidad de los datos con que han de operar los agentes del sistema y las ideas, objetivos, incentivos, costes y señales de realimentación que motivan o condicionan el comportamiento.

Esta nueva estructura de información también cambiará probablemente sus estructuras sociales y físicas.

Si en el devenir de la Historia de la Humanidad ha habido dos revoluciones tecnológicas realmente importantes, la agrícola y la industrial, la nueva estructura del sistema sería el germen de la revolución de la sostenibilidad.

Siguiendo con este nuevo modelo del sistema, se diseñan varios escenarios que intentan implantar esta nueva forma de hacer las cosas. Los escenarios próximos plantean una limitación deliberada del crecimiento.

La **proyección P7**⁵⁵ introduce el control poblacional.

El mundo aspira a una población estable a partir de 2002, y se fija el tamaño familiar deseado en 2 hijos. Gracias a esta política de planificación familiar, la población alcanza su máximo en 2040 (7.500 millones), cifra cercana a la de la proyección p2. La explicación de esas cifras tan parejas está en que incluso sin esta política la población en el 2000 se está acercando rápidamente a un nivel de vida en que las familias pequeñas son deseables de todos modos.

El resultado de este escenario es que el crecimiento continuo del capital es tan insostenible como el crecimiento de la población, llegándose al colapso por una crisis de contaminación.

⁵⁵ Los escenarios p7 y p8 no se representan porque son muy similares al p9

En la **proyección p8** el mundo aspira a una población estable y un producto industrial estable por persona a partir de 2002, moderándose la demanda de hijos y el tren de vida material.

Lograr este segundo cambio significaría que la población del planeta basaría su condición social, se consideraría satisfecha y centraría sus aspiraciones en objetivos distintos del crecimiento continuo de la producción y la interminable acumulación de riqueza material.

El mundo aspira a un producto industrial per cápita para todos que se sitúa un 10% por encima del promedio del 2000. Además el modelo alcanza este nivel de producción con menor inversión, ya que opta por diseñar el equipamiento de capital de forma que dure un 25% más. Se supone que la vida útil del capital industrial asciende de 14 a 18 años, la del capital de servicios de 20 a 25 años y la de los insumos agrícolas de 2 a 2,5 años.

Aumentan notablemente los bienes de consumo y servicios per cápita, ya que hay que invertir menos productos industriales en crecimiento del capital y en reponer la amortización.

Pero esta economía no es muy estable, ya que su huella ecológica es superior a la sostenible y cae forzosamente en un largo declive después de 2040.

Aunque el mundo de p8 logra sostener a más de 7000 millones de personas con un nivel de vida suficiente de 2010 a 2040, el declive causado por la carestía de alimentos y el aumento de la contaminación se alcanza después de 2040.

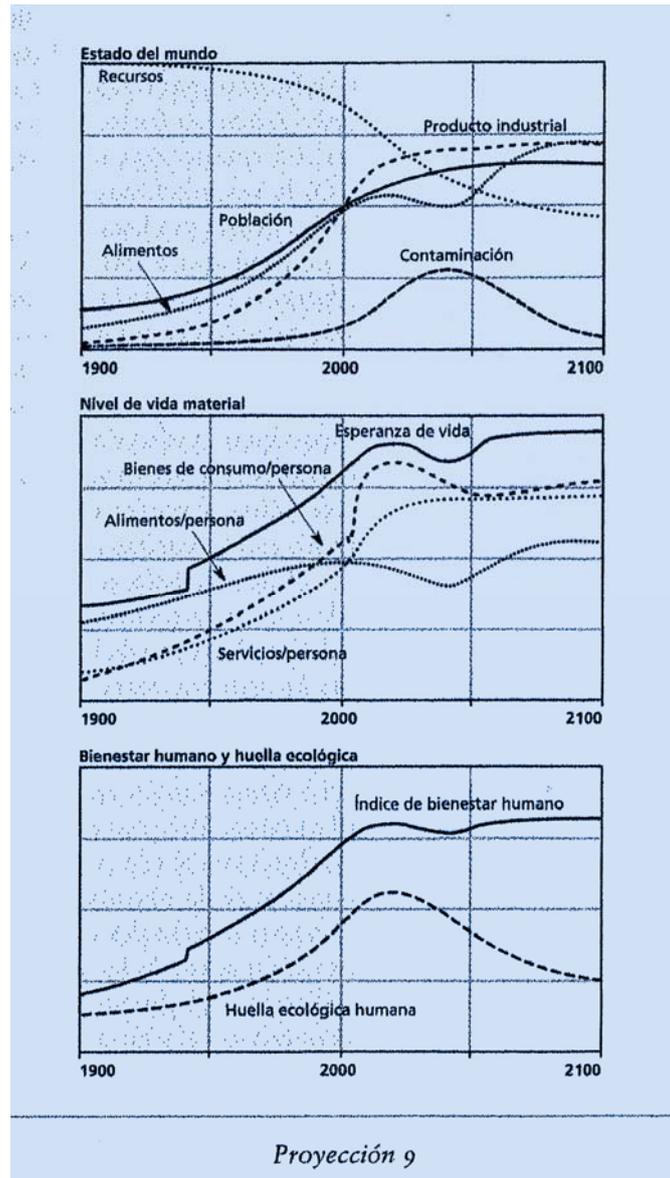


FIGURA 54. PROYECCIÓN 9

Proyección p9. Limitación del crecimiento y mejora tecnológica.

A p8 se le añade las tecnologías de mejora ya vistas en otras proyecciones. A saber, tecnologías de mejora de la contaminación, del uso de recursos y del rendimiento agrícola a partir de 2002.

Al igual que en p6, estas tecnologías solo resultan efectivas al cabo de un período de 20 años.

Como la población crece más lentamente y el capital no tiene que alimentar un mayor crecimiento o hacer frente a la escalada de una serie de problemas, las nuevas tecnologías pueden sostenerse plenamente. Si funcionan de modo constante durante un siglo, reducen un 80% el uso de recursos no renovables por unidad de producto industrial y un 90% la generación de contaminación por unidad de producto.

Como el crecimiento del producto industrial está contenido, estas ventajas se agregan en forma de reducción real de la huella ecológica.

Alrededor de 2040, la mejora de la tecnología reduce la contaminación, el rendimiento de la tierra se recupera y aumenta lentamente durante el resto del siglo.

La población se estabiliza en una cota de menos de 8.000 millones y su esperanza de vida es alta, aunque desciende ligeramente durante el período en que zozobra la producción de alimentos. La prestación de servicios per cápita crece hasta un 50% por encima del nivel del 2000.

Al final del siglo XXI hay alimentos suficientes para todos, los recursos no renovables se agotan tan lentamente que en el año 2100 todavía hay disponibles el 50% de las reservas originales, la tasa de extracción de recursos no renovables disminuye a partir de 2010, la erosión del suelo se reduce después de 2002 y la generación de contaminantes persistentes alcanza el máximo 10 años después.

El sistema ha alcanzado el EQUILIBRIO.

En dinámica de sistemas la palabra equilibrio significa que los ciclos de realimentación positivos y negativos se compensan recíprocamente y que las principales existencias del sistema (población, capital, tierra, fertilidad del suelo, recursos no renovables y contaminación) se mantienen en un nivel bastante constante. El equilibrio no implica estancamiento.

El mundo p9⁵⁶ cuenta con casi 8000 millones y con suficientes alimentos, bienes de consumo y servicios para sostenerlos a todos en bienestar. Dedicamos bastantes esfuerzos y empleamos tecnologías continuamente mejoradas para proteger las tierras y los suelos, reducir la contaminación y utilizar recursos no renovables con un alto grado de eficiencia. Dado que su crecimiento físico se desacelera y acaba frenándose por completo, y dado que sus tecnologías funcionan con la suficiente rapidez para rebajar su huella ecológica hasta un nivel sostenible, tiene tiempo, capital y capacidad para resolver sus demás problemas.

Si todas esas políticas se introdujeran 20 años antes, es decir, en 1982, la población sería de 6000 millones, la contaminación menor y la esperanza de vida de 80 años.

En definitiva, una sociedad más alejada de sus límites, lo que demuestra que los retrasos reducen los niveles de abundancia de que podríamos gozar finalmente de modo sostenible.

Según la Comisión Mundial de Medio Ambiente, una sociedad sostenible es aquella que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

Desde el punto de vista de la teoría de sistemas, una sociedad sostenible es aquella que cuenta con mecanismos informativos, sociales e institucionales que le permiten controlar los ciclos de realimentación positivos causantes del crecimiento exponencial de la población y el capital⁵⁷.

Herman Daly define como debe ser un sistema sostenible material y energéticamente, y lo hace en función de tasas de uso de fuentes y sumideros:

- La tasa de uso de recursos renovables no debe superar la tasa de regeneración de los mismos.

⁵⁶ Los autores del libro "Los límites del crecimiento" sostienen que p9 está al alcance de la mano del mundo actual.

⁵⁷ Ciclos realimentación compensados: Tasas natalidad = tasas mortalidad y tasas inversión = tasas amortización

- La tasa de uso de recursos no renovables no debe superar la tasa de desarrollo de sustitutos renovables sostenibles de aquellos.
- La tasa de emisión de contaminación no debe superar la capacidad de asimilación del medio ambiente.

Una sociedad sostenible no significa crecimiento cero.

Una sociedad sostenible impulsa el desarrollo cualitativo, no la expansión física, utiliza el crecimiento material como un instrumento estudiado, no un mandato perpetuo.

Una sociedad sostenible no conservaría de modo permanente pautas de distribución desiguales, no sería una sociedad de estancamiento, desempleo y quiebra.

No hay motivo por el cual una sociedad sostenible tenga que ser primitiva en el aspecto técnico y cultural⁵⁸.

Un mundo sostenible tendría reglas y normas que se aplicarían para crear libertades o protegerlas.

Una sociedad sostenible no tiene porque ser uniforme y no democrática.

Algunas líneas maestras para reestructurar nuestro sistema con vistas a la sostenibilidad serían:

- Ampliar el horizonte de planificación
- Mejorar las señales
- Acortar los tiempos de respuesta
- Minimizar el uso de recursos no renovables
- Prevenir la erosión de recursos renovables
- Utilizar todos los recursos con máxima eficiencia
- Desacelerar y finalmente parar el crecimiento exponencial de la población y del capital físico.

La revolución sostenible surgirá a partir de las visiones, deducciones, experimentos y acciones de miles de millones de personas.

Dos aspectos a tener en cuenta serán la información, que deberá ser relevante y seleccionada, y la resistencia feroz de los sistemas a los cambios de sus flujos de información, especialmente de sus reglas y objetivos.

⁵⁸ "Un estado estacionario del capital y la población implica un estado no estacionario de la mejora humana" (J.S.Mill)

Para el cambio de estructura, nuestros pilares deberán ser la visión con acción y orientación, la coordinación mediante redes, los flujos informativos veraces, la búsqueda del aprendizaje y el amor y la comprensión institucionalizadas en soluciones colectivas⁵⁹.

⁵⁹ [...] no está lejos el [...] día en que el Problema Económico se ubicará en el asiento de atrás que le corresponde y [...] el foro del corazón y la cabeza estará ocupado... por nuestros problemas reales: el problema de la vida y las relaciones humanas, de la creación, el comportamiento y la religión (J.M.Keynes, 1932)

Sistema obra de construcción

Sistema obra de construcción

1. Legislación sobre sostenibilidad en la construcción. Estado de la cuestión

Las primeras aproximaciones al concepto de sostenibilidad aparecen en libros como “Blueprint for Survival” de Goldsmith⁶⁰, o el informe del Club de Roma “Limits to Growth”, ambos publicados en 1972.

Ese mismo año la Conferencia de Naciones Unidas “Sólo una Tierra”, celebrada en Estocolmo, proponía la reconciliación entre el medio ambiente y el desarrollo económico. Además se estableció un Plan de Acción y se creó el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

La definición más conocida de desarrollo sostenible es la siguiente: “que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”⁶¹.

Otras definiciones son que la sostenibilidad es un concepto basado en el equilibrio de diferentes aspectos, cuyos resultados algunos autores han definido como solidaridad, o es un triángulo de equilibrios entre lo ecológico, lo económico y lo social.

La suma de aproximaciones parciales o sectoriales a la sostenibilidad no da un resultado sostenible, por lo que será necesaria una aproximación global y conjunta, holística, tal como defiende la teoría sistémica.

En su exposición de motivos la ley GICA⁶², aprobada este mismo año, habla de conceptos como el desarrollo sostenible o la calidad del medio ambiente: “La proliferación de instrumentos al servicio de políticas de desarrollo sostenible ha evolucionado y madurado en los últimos años en el plano internacional, desde la Conferencia de Estocolmo en 1972, hasta las más recientes en Río (1992) o Johannesburgo (2002), pero también en los ámbitos europeo, estatal, regional o local. Hemos presenciado con satisfacción la elevación del concepto de desarrollo sostenible a la categoría de principio en el Tratado de Ámsterdam (1997) y su inclusión en la Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea (2000). El VI Programa Comunitario en materia de medio ambiente reconoce, en este sentido, que aún siendo hoy prioritario mejorar la aplicación de las normas ambientales, es preciso adoptar un enfoque más estratégico para inducir los cambios necesarios en nuestros modelos de producción y consumo.”

Vemos claramente cómo se está hablando de cambios en los modelos de producción que ya se recogen en los escenarios de World3.

También la ley GICA dice expresamente que intenta dar respuesta a las tres dimensiones del concepto

⁶⁰ Goldsmith, Edward, en colaboración con Allen, Robert. A Blueprint for Survival. Publicado por la revista The Ecologist, vol. 2 n.1, Londres enero 1972. Meadows, Donella et al. Limits to Growth. Informe encargado por el Club de Roma. Edita Universe Books, New York 1972.

⁶¹ Informe “Nuestro futuro común” o “Informe Brundtland”, 1987

⁶² Ley 7/2007, de 9 de Julio, de la Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA) de la Junta de Andalucía.

de desarrollo sostenible (ambiental, social y económico). En el artículo 3 (Principios) del título I, aparece el principio de utilización racional y sostenible de los recursos naturales para salvaguardar el derecho de las generaciones presentes y futuras a la utilización de los mismos, que recuerda mucho al principio de desarrollo sostenible. Algunos aspectos fundamentales de esta ley son:

- Planeamiento urbanístico. Evaluación de impacto ambiental
- Se establecen las garantías de protección de la calidad ambiental del aire, agua y suelos, así como de la gestión de los residuos.
- Se regula por primera vez en Andalucía la contaminación lumínica
- Respecto de la calidad ambiental de los suelos, se introducen y desarrollan aquellos aspectos contemplados en el Real Decreto 9/2005 de 14 de Enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo.
- Se actualiza el régimen para los residuos, adoptándose como prioridad en el modelo de gestión⁶³ de los mismos y, por este orden, minimizar su producción en origen y fomentar su reutilización y reciclado. El principio general es fomentar el aprovechamiento, es decir, la valorización⁶⁴ frente a la eliminación⁶⁵ en vertedero⁶⁶, todo ello de acuerdo con los principios de jerarquía establecidos en la normativa comunitaria para la correcta gestión de los residuos. En el artículo 104, producción de RCD⁶⁷, se recogen conceptos similares a los del **proyecto de Real Decreto del Ministerio de Medio Ambiente** por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, de fecha 5 de Octubre de 2006⁶⁸.
- Principio de quién contamina paga, conforme al cual los costes derivados de la prevención de las amenazas o riesgos inminentes y la corrección de los daños ambientales corresponden a los responsables de los mismos.
- Principio de adaptación al progreso técnico

Medidas europeas y nacionales dentro del ámbito de la sostenibilidad en la construcción.

Entre las directivas europeas, las principales relacionadas con este ámbito son la de Productos de Construcción (1989/106/CE), la de Eficiencia Energética (2002/91/CE) y la de Productos que usan energía (2005/32/CE).

⁶³ Gestión: la recogida, el almacenamiento, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas actividades, así como la vigilancia de los lugares de depósito o vertido después de su cierre.

⁶⁴ Valorización: recuperación o reciclado de determinadas sustancias/materiales contenidas en los residuos, incluyendo reutilización directa, reciclado e incineración con aprovechamiento energético.

⁶⁵ Eliminación: todo procedimiento dirigido, bien al vertido controlado de los residuos en depósito o bien a su destrucción, total o parcial, realizado sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente. En algunas legislaciones se acepta como eliminación la incineración sin aprovechamiento energético.

⁶⁶ Vertedero: instalación de eliminación que se destina al depósito de residuos en la superficie o bajo tierra.

⁶⁷RCD: residuo de construcción y demolición. "Cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de "Residuo" incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de Abril, se genere en una obra de construcción y demolición.

⁶⁸ En el trabajo se va a denominar a este futuro decreto "Proyecto MMA"

Entre las políticas nacionales tenemos:

- Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (2004-2012)
- Plan de Energías Renovables 2005-2010
- Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) y Código Técnico (RD 314/2006)
- Certificación Energética (Real Decreto 47/2007)
- Nuevo Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios RITE

Y entre las normas internacionales, europeas y nacionales:

- Technical Committee ISO/TC59/SC17 “Building construction/ Sustainability in building construction”
- Technical Committee CEN/TC350 “Sustainability in construction works”
- Comité Técnico AEN/CTN41/SC9 “Construcción Sostenible”.

Es importante citar la Estrategia de Medio Ambiente Urbano (impulsada por el 6º Programa de Acción Comunitario en materia de Medio Ambiente), europea y española, y del Libro Verde de Medio ambiente Urbano, ya que una de las prioridades de esos documentos es la construcción sostenible, que se define como: “Aquella que, desde planteamientos respetuosos y comprometidos con el medio ambiente, utiliza adecuadamente el agua y los distintos tipos de energía; selecciona desde el proyecto y aplica eficientemente durante la obra recursos, tecnologías y materiales; evita los impactos ambientales; gestiona los residuos que genera en su ciclo de vida; busca un mantenimiento y conservación adecuados del patrimonio construido; reutiliza y rehabilita siempre que es posible, es rentable y, además y finalmente, resulta más accesible, confortable y saludable”⁶⁹.

Por tanto, la gestión de los residuos en la obra de construcción es un punto fundamental para determinar la sostenibilidad en la construcción.

Marco legislativo europeo para la gestión de los RCD

1. Estrategia Comunitaria sobre residuos (resolución de la Comisión Europea del 7 mayo de 1990), estableciendo el protocolo de gestión de residuos (**principio de jerarquía**).
 1. Prevención : reducción volumen y toxicidad
 2. Reutilización: sin tratamiento físico
 3. Reciclado (incluye compostaje y biometanización)
 4. Valorización energética: incineración.
 5. Depósito controlado en vertederos

⁶⁹ García Navarro, Justo. Jornada Técnica sobre “Normalización y Sostenibilidad en la Construcción”. Construmat, Barcelona, 16 de Mayo de 2007.

2. Directiva Marco 18 Marzo 1991. Reglas generales de aplicación a todo tipo de residuos
3. 5º Programa Comunitario de Política y Actuación en Materia de Medio Ambiente (“Hacia un desarrollo sostenible”). 1993-2000.
4. Estrategia Comunitaria sobre residuos (Resolución de la Comisión Europea del 24 febrero de 1997), donde se introducen los principios fundamentales de: “QUIEN CONTAMINA PAGA” y de “RESPONSABILIDAD COMPARTIDA”. También se avanzan instrumentos para el conocimiento profundo de los procesos de fabricación de los materiales, como el análisis del ciclo de vida (ACV) y las auditorías ambientales.
5. Informe Symonds⁷⁰, donde se establecen parámetros de volúmenes y de reutilización en los países de la UE.
6. Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
7. Decisión de la Comisión de 16 de Enero de 2001 que modifica a la Decisión 2000/532/CE sobre la lista Europea de residuos (Catálogo CER).
8. Decisión 2003/33 de la Comisión sobre criterios de admisión de residuos en vertedero.
9. 6º Programa de Acción Europeo en materia de Medio Ambiente. 2002-2012. Entre sus prioridades temáticas se encuentran los recursos naturales y los residuos. En relación con los RCD, el Programa exige una mayor eficiencia en la gestión de los recursos y residuos que posibilite una reducción global de su volumen. También recomienda ir a modelos de producción sostenibles que permitan la disociación crecimiento económico-utilización de recursos.

Marco legislativo español

1. **Ley 10/1998 de 21 de Abril, de Residuos.** Transpone la Directiva 91/156/CE. Distribuye las competencias en materia de medio ambiente. Al Estado le corresponde la redacción de planes nacionales y la autorización de traslados de residuos desde o hacia países que no pertenecen a la UE. A las Comunidades Autónomas, la redacción de planes autonómicos, las competencias sobre autorización, vigilancia... de las actividades de producción y gestión de residuos, la autorización de traslados de residuos desde o hacia países que pertenecen a la UE y cualquier otra actividad sobre la que no recaiga la competencia estatal o local. A las Entidades locales, la competencia sobre la gestión de los residuos urbanos⁷¹.
2. **Plan Nacional RCD 2001-2006.** Entre sus principios está: el de jerarquía, de proximidad, la posibilidad de acuerdos productor-gestor y la inclusión de la gestión de los residuos en los proyectos constructivos, incluida la financiación de la misma. Entre sus objetivos está: la recogida controlada y correcta gestión de al menos el 90% de los RCD en 2006, la disminución de al menos el 10% del flujo de RCD en 2006 y el reciclaje o reutilización de al menos el 40% de RCD en 2005 y del 60% en 2006. En Comunidades como Cataluña, Madrid, Galicia, Baleares, Valencia, País Vasco o Aragón ya tienen legislación sobre RCD, y, prácticamente todas las CCAA, tienen planes

⁷⁰ Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts.CE.Febrero 1999.

⁷¹ Residuos urbanos: residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

redactados.

Entre los últimos planes aprobados se encuentran los siguientes:

- Plan gestión RCD. Aragón 2002-2011
 - Plan Gestión Integrado RCD. Madrid 2002-2011
 - Plan Gestión RCD. Castilla-La Mancha 2006-2015
 - Programa Gestión RCD. Galicia 2005-2007
3. **Real Decreto 1481/2001, de 27 de Diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.** El objetivo del Real Decreto es la implantación de un marco jurídico y técnico adecuado para las actividades de eliminación de residuos mediante su deposición controlada, transponiendo la Directiva Europea 1999/31. Se establecen los tipos de vertederos según el tipo de residuos.
 4. Orden Ministerio de Medio Ambiente 304/2002, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la Lista europea de residuos⁷².
 5. **Proyecto MMA.** Borrador en el que se regula la producción y gestión de los RCD. Define en el artículo 1 el objeto del mismo: "...prevenir la generación, fomentar la reutilización y el reciclado, asegurar la eliminación con el tratamiento adecuado,...para proteger la salud de las personas y el medio ambiente, y contribuir a un *desarrollo sostenible*..."
 6. **II Plan Nacional RCD.** En el Plan Nacional Integral de Residuos 2006-2015, todavía en fase de borrador, se está tramitando el II Plan Nacional de RCD, cuyo plan previo abarcaba de 2001 a 2006. En este segundo Plan, se recogen como objetivos propuestos la recogida controlada y correcta gestión del 95% de los RCD a partir de 2011, la reducción o reutilización del 15% de RCD a partir de 2011, el reciclaje del 40% de RCD a partir de 2011 o la recogida selectiva y correcta gestión del 95% de los residuos peligrosos a partir de 2008.

Marco legislativo andaluz

1. Decreto 218/99, de 26 de Octubre, de la Junta de Andalucía, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos de Andalucía 1999-2008.
2. Decreto 104/2000, de 21 de marzo, de la Junta de Andalucía, por el que se regulan las autorizaciones administrativas para la valorización y/o eliminación de residuos urbanos.

Marco legislativo de la provincia de Sevilla

1. Plan Provincial de residuos de la Diputación de Sevilla. Enmarcados en este Plan como residuos del Grupo C: "escombros y restos de obra", se reflejan las directrices marcadas en el año 1998-99 para este tipo de residuos. Entre los objetivos del Plan, la reducción mediante la prevención, el reciclaje y

⁷² En permanente actualización. <http://www.lexureditorial.com/boe/200202/03285.htm>

la valorización.

2. **Ordenanza Marco de la Mancomunidad de Los Alcores.** 24 de noviembre de 2003. Tiene por objeto regular las operaciones de gestión de los residuos generados en la construcción y demolición, para conseguir una efectiva protección del Medio Ambiente. Sus modificaciones para adaptarlas a cada ordenanza local están recogidas en la Ordenanza Municipal de Limpieza Pública y Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos de Sevilla, en la Modificación de la Ordenanza Municipal de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos y Limpieza Pública de Carmona (9/06/2004) y en la Ordenanza Reguladora de la gestión de RCD de Alcalá de Guadaira (8/02/2005).

3. **Avance del Plan especial de indicadores de sostenibilidad ambiental de la actividad urbanística de Sevilla.** Gerencia de Urbanismo de Sevilla. Enero, 2007. En él se establecen indicadores relacionados con la morfología urbana (por ejemplo, densidad edificatoria), con el espacio público y la movilidad, con la organización urbana, con el metabolismo urbano, con el aumento de la biodiversidad y con la cohesión social. Incluso plantea el concepto de función guía de la sostenibilidad. El plan presenta muchos aspectos que se recogen en la Estrategia de Medio ambiente Urbano y del Libro Verde de Medio Ambiente Urbano, ambos documentos presentados por el Ministerio de Medio Ambiente. En el apartado de indicadores relacionados con el metabolismo urbano, se plantean dos condicionantes relacionados con la gestión de RCD:
 1. Condicionante 4.4: Minimización y recuperación de residuos generados en la construcción y demolición (RCD). Inclusión de Plan de Gestión. Considera dos aspectos, reciclaje o reutilización del 60% de RCD y separación en origen del 100% de los residuos peligrosos contenidos en RCD.

 2. Condicionante 4.5.: Uso de materiales reutilizables, reciclados y renovables en obras. Considera que del 25 al 30% de los materiales reciclados deben utilizarse en obras.

2. La obra de construcción

Una vez analizada en profundidad la estructura de la dinámica sistémica y sus aplicaciones a sistemas relacionados con la sostenibilidad y el crecimiento, y antes de entrar en este apartado, conviene recordar algunas de las características principales de los sistemas dinámicos:

- Los ciclos de realimentación positivos son precursores del crecimiento exponencial y de la dinámica autorreforzadora.
- Los ciclos de realimentación negativos son precursores de los procesos autorreguladores.
- Los sistemas abiertos autorregulados evolucionan hacia estados de creciente complejidad.
- Cuando los ciclos de realimentación se compensan se alcanza el estado de equilibrio. En los seres vivos, ese estado se denomina uniforme y permite alcanzar estados de mayor complejidad.
- Los sistemas complejos son no lineales.
- Son intuitivamente falsos.
- Marcadamente insensibles a cambios en muchos parámetros del sistema.
- Se controlan a través de los puntos de influencia o de presión.
- Largo plazo versus corto plazo. El cambio en un sistema complejo comúnmente causa en el corto plazo una respuesta en el sentido opuesto del largo plazo.
- Las variables de estado y de flujo (endógenas), las exógenas, y consecuentemente, los límites o fronteras del sistema.
- Los sistemas dinámicos relacionados con el crecimiento del planeta tienen que tener en cuenta los límites físicos (fuentes, sumideros) y los estados que pueden llevar al sistema a la extralimitación y el colapso.

Muchas de estas características aparecerán en nuestros modelos para los sistemas constructivos, porque la mayoría de los sistemas dinámicos se comportan de forma similar.

En este apartado se pretende diseñar la estructura integrada de la obra de construcción, de forma que nos permita definir los flujos internos desde el punto de vista de los residuos que se generan en la misma, siguiendo minuciosamente lo redactado en el Proyecto MMA.

Se partirá del modelo de obra diseñado para el análisis de presupuesto de obras por el investigador D. Antonio Ramírez de Arellano Agudo, catedrático de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Sevilla y tutor de este trabajo. Gran parte de los conceptos que se introducirán aquí están recogidos en su libro "La teoría de sistemas al servicio del análisis de presupuesto de obras".

Para la descripción del sistema obra de construcción es necesario determinar o perfilar la estructura del entorno general y del entorno específico, siendo este último el que incide directamente sobre el sistema.

La obra se va a considerar como un sistema cuasiaislado y cuasidivisible.

Un sistema se denomina cuasiaislado cuando está influenciado por el entorno según insumos, entradas o inputs, y a su vez el sistema incide en el entorno según outputs o salidas de elementos del sistema⁷³.

Igualmente se denomina cuasidivisible cuando se puede descomponer en sistemas cuasiaislados, que están ligados entre sí y con el entorno del sistema. Se define por la red de interacciones entre subsistemas, las relaciones entrada-salida de cada subsistema y las que vinculan al entorno con el sistema.

Los principales subsistemas en los que se divide la obra de construcción son:

1. Proyecto. Modelo normativo donde están definidos todos los elementos de la obra
2. Ejecución
3. Contratación. Desde el punto de vista del flujo de materiales de entrada y salida no intervendrá, aunque siempre haremos referencia a él ya que es otra fase del proceso constructivo.

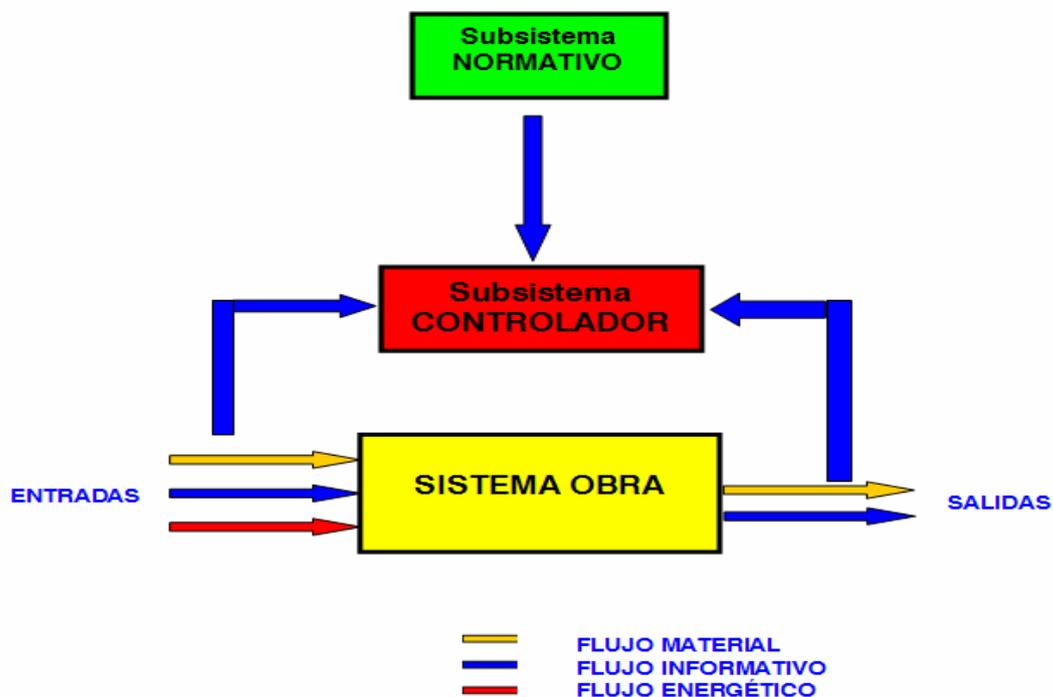


FIGURA 55. Sistema obra de construcción

⁷³ La teoría de sistemas al servicio del análisis de presupuesto de obras. Antonio Ramírez De Arellano Agudo. Editorial Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla. Sevilla, 1989.

Los agentes implicados en el sistema obra serán el Estado, los promotores, el equipo técnico, los constructores y los gestores de residuos.

El Estado, cuya intervención se desarrolla en tres campos, legislador, motivador (subvenciones, exenciones fiscales....) y promotor (por ejemplo, en la promoción de viviendas de protección oficial).

El promotor, cuya relación con los otros agentes será de la siguiente forma: con el Estado a través de la legislación. Con el constructor para que realice los proyectos. Con el equipo técnico para que redacte los proyectos y contrate la ejecución. Y con los gestores para establecer los sistemas de gestión de recogida de los residuos.

El equipo técnico se relaciona con el Estado a través de la legislación, con el promotor para materializar los proyectos, con el constructor y promotor para que las relaciones entre ellos sean equilibradas y con el gestor para el diseño de los planes de gestión.

El constructor con el Estado a través de la legislación y como ejecutor de las obras que promueve. Con el promotor como ejecutor de las obras. Con el equipo técnico, como responsable de que las construcciones se desarrollen según los proyectos redactados. Y con los gestores como el responsable de la gestión de los residuos en obra.

El gestor con el resto de agentes como ya se ha indicado en los puntos anteriores.

3. Descripción del sistema

3.1. Fronteras

Las fronteras del sistema no son visibles, no se materializan, como era el caso de la dinámica global y la dinámica urbana.

Nuestros límites permiten los flujos en ambos sentidos, es decir, desde el sistema hacia el entorno y viceversa, y para conocerlos utilizaremos como hilo argumental el proceso que recorre la vida del sistema.

El inicio del sistema aparece cuando el promotor toma la decisión de promover la ejecución de la obra. Por tanto, la *decisión de construir* es una frontera del sistema.

El fin del sistema llega cuando la obra concluida es recibida por el promotor y los directores técnicos firman el certificado de terminación de la obra. Por tanto, la *recepción de la obra* también es frontera del sistema.

El mantenimiento de la obra no se incluye en el ciclo de vida de la obra.

Resumiendo, “el período de tiempo comprendido entre la decisión de construir y la recepción de la obra determina el período de vida del sistema”.

Habrá que tener en cuenta también los aspectos geográficos, como los relacionados con el solar donde se ubicará la obra. O la climatología de la zona, topografía del terreno, orientación y geometría del solar.

Se pueden concretar de la siguiente forma las fronteras del sistema:

1. Aspectos temporales

- Decisión de construir
- Recepción de la obra

2. Aspectos geográficos

- Climatología
- Topografía del terreno
- Orientación geográfica
- Geometría del solar
- Aptitud del terreno

- Ubicación de plantas de tratamiento. Las plantas de tratamiento de materiales de construcción se pueden situar en la propia obra o fuera de ella.
- Ubicación de los vertederos. Según reza el artículo 2 del Proyecto MMA, “se considerará parte integrante de la obra toda instalación que de servicio exclusivo a la misma, y en la medida en que su montaje y desmontaje tenga lugar durante la ejecución de la obra o al final de la misma, tales como plantas de machaqueo, plantas de fabricación de hormigón, almacenes⁷⁴ de materiales y almacenes de residuos de la propia obra y plantas de tratamiento⁷⁵ de los RCD de la obra”.

Por tanto, la ubicación de los vertederos, principalmente de residuos inertes⁷⁶, también definen los límites físicos de la obra, ya que dependiendo de la distancia a la que se encuentren el coste de la obra puede variar.

Se puede observar que del hecho de introducir la gestión de los residuos como parte del proceso constructivo hace que los límites físicos se ensanchen y alcancen la ubicación de los vertederos que también se consideran parte de la obra.

3. Aspectos estéticos/técnicos

- Ingeniería
- Tecnología
- Materiales empleados. Se pueden considerar materiales nuevos o procedentes de la reutilización o el reciclado, incluso de la propia obra. De hecho, ya existe un precedente legislativo donde se cita la expresión “materia prima secundaria⁷⁷”.
- Nivel de formación, cultura, gustos....

4. Aspectos relacionados con los mercados

- Características de los mercados de productos. Cuando hablamos de producto nos referimos a la obra ya terminada.

⁷⁴ Almacenamiento: El depósito temporal de residuos, con carácter previo a su valorización o eliminación, durante el tiempo establecido en la normativa básica u otro inferior fijado reglamentariamente para cada tipo de residuo y operación. No se incluye en este concepto el depósito temporal de residuos en las instalaciones de producción con los mismos fines y por períodos de tiempo inferiores a los señalados en el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

⁷⁵ Tratamiento previo al vertido: proceso físico, térmico, químico o biológico, incluida la clasificación, que cambia las características de los residuos reduciendo su volumen o su peligrosidad, facilitando su manipulación o mejorando su comportamiento en el vertedero.

⁷⁶ Residuo inerte: aquel residuo no peligroso que no experimenta transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas, no es soluble ni combustible, ni reacciona física ni químicamente ni de ninguna otra manera, no es biodegradable, no afecta negativamente a otras materias con las cuales entra en contacto de forma que pueda dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana; la lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes del residuo y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas. Proyecto MMA.

⁷⁷ Los objetos o sustancias residuales de un proceso de producción, transformación o consumo, que se utilicen de forma directa como producto o materia prima en un proceso que no sea de valorización, en el sentido definido por la normativa sobre residuos y sin poner en peligro la salud humana, ni causar perjuicios al medio ambiente. Ley 7/2007, de 9 de Julio, de la Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA) de la Junta de Andalucía.

- Características de los mercados de factores. Dentro de los factores tendremos los materiales y la mano de obra. En ese mercado de materiales podremos hablar entre otros, de materiales reciclados (por ejemplo, áridos reciclados) obtenidos como producto de una operación de valorización de RCD.
- Características del mercado de trabajo
- Organización de las empresas constructoras. Como indica el Proyecto MMA, las empresas constructoras deberán disponer de sistemas de gestión de RCD.
- Organización de los gestores de valorización

5. Aspectos legales

1. Legislación en materia de promoción

- Proyecto MMA
- Ordenanzas locales⁷⁸

2. Legislación en materia de construcción

- Proyecto MMA
- Ordenanzas locales

3. Planificación urbanística.

- Ley GICA: introduce en el título 3, instrumentos de prevención y control ambiental, en su capítulo 2, artículo 40, la evaluación ambiental de los instrumentos de planeamiento urbanístico.
- Plan especial de indicadores de sostenibilidad ambiental de la actividad urbanística de Sevilla. En él se establecen indicadores relacionados con la morfología urbana (por ejemplo, densidad edificatoria).

4. Estructura general de leyes relacionadas con la sostenibilidad (vista en el primer apartado)

⁷⁸ Ordenanza Marco de la Mancomunidad de Los Alcores. B.O.P 24 de noviembre de 2003.

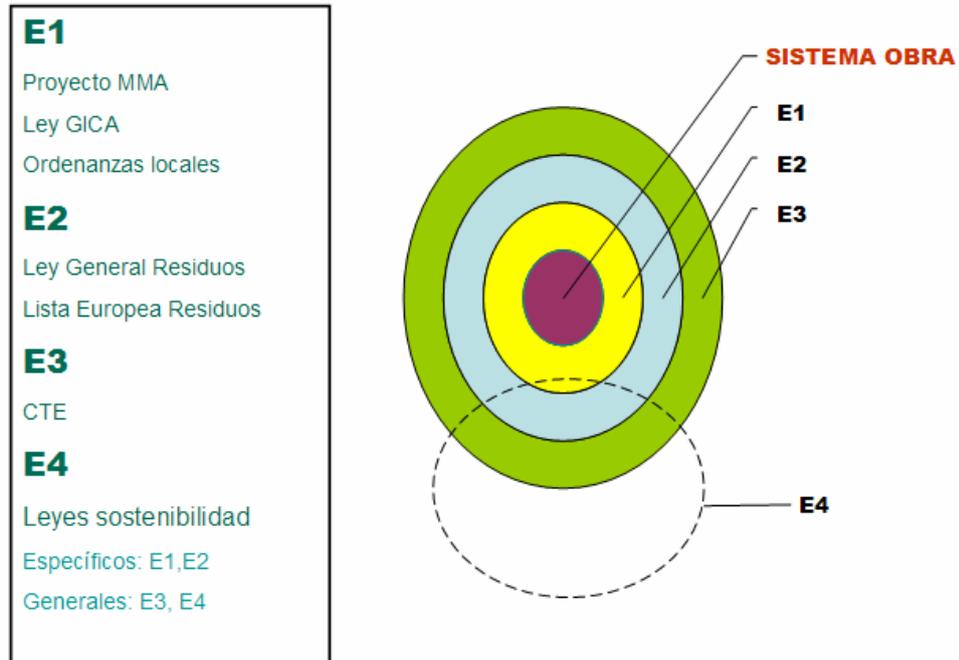


FIGURA 56. Sistema/entorno

6. Aspectos financieros

- Mercado financiero: Habrá que considerar, entre otros, la relación Productor/Promotor/ Gestor y el establecimiento y recuperación de fianzas.

3.2. Flujos de interacción sistema-entorno (inputs/outputs)

Tal como se han definido en el esquema, los flujos serán de entrada o salida, y podrán ser físicos (de materia y energía) e informativos.

3.2.1. Flujos de entrada

FÍSICOS MATERIALES

Promotor

Es el productor⁷⁹ de RCD, público o privado, penetra en el sistema aportando los elementos de

⁷⁹ Productor: persona física o jurídica titular de la licencia urbanística en una obra de construcción y/o demolición; en aquellas obras que no precisen de licencia urbanística, tendrá la consideración de productor del residuo la persona física o jurídica titular del bien inmueble objeto de una obra de construcción y/ demolición. También será productor la persona física o jurídica que efectúe operaciones de tratamiento, de mezcla o de otro tipo, que ocasionen un cambio de naturaleza o de composición de los residuos. Proyecto MMA

referencia que dan origen al mismo y permanece durante toda la vida del sistema, es un invariante temporal.⁸⁰

Equipo de diseño

Responsable de la redacción del proyecto. Lo componen el conjunto de personas y los medios técnicos de los que disponen.

Material fungible

Papel, soportes magnéticos...

Suelo

El terreno donde se ubica la obra. Invariante.

Dirección técnica

Empresa constructora

Es el poseedor⁸¹ de RCD y participa como ejecutor de la obra.

Gestor de residuos

Responsable de los residuos que salen de la obra. Los gestores pueden ser de operaciones de recogida, almacenamiento, transferencia, transporte, valorización o eliminación, es decir, que se incluyen en este apartado empresas de transporte, plantas de transferencia, empresas de tratamiento y transformación de RCD (plantas de valorización) y empresas propietarias de vertederos.

Factores productivos

- Materiales. Por ejemplo, material reutilizado, como las tierras de excavación reutilizadas.
- Maquinaria. Por ejemplo, plantas de machaqueo, almacenes para acopio de materiales, almacenes para acopio de residuos en obra o plantas de tratamiento de RCD.
- Mano de obra

Flujos financieros

Para :

- Pago de honorarios

⁸⁰ Aunque también puede darse el caso de que abandone la obra, haciéndose cargo de la misma otro promotor hasta su finalización.

⁸¹ Poseedor: el productor de RCD o la persona física o jurídica que los tenga en su poder y que no tenga la condición de gestor de residuos. En todo caso, tendrá la consideración de poseedor la persona física o jurídica que ejecute la obra de construcción y/o demolición. Proyecto MMA

- Pago de licencias y autorizaciones
- Fianzas para obras sometidas a licencia⁸².

FÍSICOS ENERGÉTICOS

Energía eléctrica

Combustibles

INFORMATIVOS

Planificación urbanística del territorio

Características del suelo

Normas para la redacción de proyectos

Legislación civil y mercantil

Proyecto MMA

El futuro Real Decreto será el documento de referencia en la obra para llevar a cabo el plan de gestión de residuos al que obliga el mismo⁸³.

Ordenanzas locales

La de mayor importancia en nuestra provincia es la Ordenanza Marco de la Mancomunidad de Los Alcores, a la que le siguen todas las ordenanzas locales aprobadas por los municipios que pertenecen a la Mancomunidad (entre otras, Sevilla, Alcalá de Guadaíra y Carmona).

CTE

El Código Técnico de la Edificación será el marco referencial a tener en cuenta en el proyecto y ejecución de la obra, aunque en él no se haga mención a la gestión de los RCD.

Lista Europea de Residuos

⁸² Desde el punto de vista de los Ayuntamientos, que son los que conceden las licencias de obra, las fianzas constituyen una importante fuente de ingresos, de dotación para las tesorerías de los mismos. Por ejemplo, en el caso de una promoción de 2000 viviendas de superficie construida media de 100 m². Suponemos un ratio medio de generación de residuos de 0,5 m³ de residuos de construcción por m² de superficie construida, por lo que se obtiene un volumen total para la promoción de 100.000 m³. El coste de la fianza total de la promoción sería 100.000 *10 € (coste fianza)= 1.000.000 €.

⁸³ Indicar que las obras menores no tienen que cumplir el Proyecto MMA, y se ajustarán a lo que digan las ordenanzas municipales.

Precios de los factores

Señalar la importancia de la nueva estructura de costes, que incorpora la posibilidad de precios negativos, para aquellos elementos reutilizados procedentes de la obra y que se ponen en el mercado. Estaríamos hablando de tejas usadas, residuos metálicos..., es decir, cualquier material que se pueda recuperar de la obra y ponerse en venta. En el BCCA^{B4} se ha realizado este año una profunda revisión del capítulo 17 (residuos) en el cual se han incorporado algunos precios negativos.

Costes de fianzas a depositar

Coste de la gestión de los RCD^{B5}

3.2.2. Flujos de salida

FÍSICOS MATERIALES

Residuos (RCD)

Los RCD una vez que salen de la obra serán responsabilidad de los gestores, que dependiendo del proceso serán: gestores transportistas, gestores de valorización, propietarios de vertederos o gestores de residuos peligrosos.

Flujos financieros

- Costes de gestión de RCD
- Intereses de las fianzas depositadas

Empresa constructora

Aunque la salida de la empresa constructora coincide con el certificado de terminación de las obras, sin embargo, permanece una relación residual derivada de las responsabilidades legales y contractuales.

Dirección técnica

Al igual que para la empresa constructora, su salida coincide con el certificado de terminación de las obras, permaneciendo la responsabilidad recogida en la LOE.

Promotor

El promotor es el principal agente de la obra, hasta tal punto que el período de invarianza coincide con la duración del proceso global. Por esto, su salida marca el final de la vida del sistema.

^{B4} Banco de Costes de la Construcción de Andalucía

^{B5} Los derechos de gestión de residuos (tratamiento) en la Mancomunidad de Los Alcores son por tierras excavadas 1,50 €/T, por residuos de obra limpios (clasificados) 6,00€/T y por residuos de obra sin clasificar 12,50 €/m3.

Empresas de gestión RCD

Transportistas, valorizadores, propietarios de vertederos....

Factores productivos

- Maquinaria. Por ejemplo, plantas móviles de machaqueo empleadas en la obra para obtener áridos reciclados.
- Materiales reciclados o reutilizados

Obra terminada

Con la recepción de la obra se cumple la finalidad del sistema. El momento a partir del cual se considera terminada la obra queda definido con la firma, por los directores técnicos, del Certificado Final de Obras y su visado en los colegios profesionales correspondientes.

INFORMATIVOS⁸⁶

Proyecto

Entre las obligaciones del promotor, está la de incluir un **ESTUDIO DE GESTIÓN DE RESIDUOS⁸⁷** en el proyecto de ejecución. Dicho estudio contendrá:

1. Estimación de la cantidad, en toneladas y metros cúbicos, de los RCD que se generarán en la obra, codificados con arreglo a la LER.
2. Medidas para la prevención de residuos en la obra.
3. Operaciones de reutilización, valorización o eliminación a que se destinarán los residuos que se generarán en la obra. Las actividades de valorización en obra deberán ser aprobadas por la dirección facultativa (artículo 8. Proyecto MMA)
4. Planos de instalaciones para almacenamiento, manejo y otras operaciones de gestión de RCD dentro de la obra.
5. Prescripciones en el Pliego de Prescripciones Técnicas (PPT) del proyecto, en relación con el almacenamiento, manejo, y operaciones de gestión de los RCD dentro de la obra.
6. Valoración del coste previsto de la gestión de los RCD, coste que formará parte del presupuesto del proyecto en capítulo aparte.

⁸⁶ En este apartado se van a incorporar todas las novedades que introduce el Proyecto MMA, y que transforman sustancialmente la estructura de trabajo de los proyectos y de la obra.

⁸⁷ Artículo 4 Proyecto MMA. En obras sometidas a licencia, para poder presentar el proyecto básico será obligatorio presentar un estudio de gestión de RCD básico que incorpore los puntos 1, 2,3, 6 y 7.

7. Inventario y sistema de gestión de residuos peligrosos.

Documentación acreditativa de la correcta gestión de los RCD

Plan de Gestión de Residuos⁸⁸

Es responsabilidad del constructor, y en él se reflejará como llevará a cabo el constructor las obligaciones que le incumban en relación con los RCD.

Una vez aprobado por la dirección facultativa y aceptado por la propiedad, pasará a formar parte de los documentos contractuales de la obra.

Posibles contenidos del plan de gestión⁸⁹:

1. Cantidad y naturaleza de los residuos que se van a originar en cada etapa de la obra.
2. Gestión a pie obra
 - a) Planificación de la obra. Habrá que estudiar las oportunidades de reutilización y reciclado, tanto dentro como fuera de la obra, y prever el tipo y volumen de residuos para organizar adecuadamente los contenedores.
 - b) Manipulación de residuos en obra. Establecer los lugares de almacenamiento y los medios para la gestión en obra.
Los contenedores deben estar en lugares que no entorpezcan la marcha de la obra y los residuos deben almacenarse justo después de que se generen para que no se ensucien y se mezclen con otros sobrantes.
 - c) Responsabilidades de los agentes

Las obligaciones del responsable de los residuos en obra deben ser:

- Cumplir las normas
- Utilizar de forma preferente productos en los que la materia prima contenga RCD en lugar de materiales nuevos.
- Disponer de un directorio de compradores potenciales de materiales usados ó reciclados
- Registro del movimiento de los residuos en la obra
- Revisar periódicamente el etiquetado correcto de los contenedores

⁸⁸ Artículo 5 Proyecto MMA

⁸⁹ Información procedente del Programa de acciones técnicas para fomentar la valorización, minimización y selección de residuos originados en las obras de construcción y demolición. ITEC, 1998.

- Incentivar la reutilización y el reciclado en la propia obra

Las obligaciones de los trabajadores serían etiquetar correctamente los contenedores y asegurarse que los residuos que salgan de la obra estén perfectamente cubiertos.

Documentación que acredite las relaciones con los distintos gestores

El Proyecto MMA, en su artículo 5 dice que la entrega de RCD a un gestor habrá de constar en documento fehaciente, en el que figurarán:

- Poseedor
- Productor
- Obra de procedencia
- Cantidad, en toneladas y m3.
- Tipo de residuos entregados, codificados con arreglo a la LER
- Gestor de las operaciones

Actas de recepción y certificados de terminación

Datos estadísticos

4. Organización y estructura interna

En las páginas anteriores hemos analizado las relaciones del sistema con el entorno. Ahora nos interesa aislarnos del exterior, y tener sólo en cuenta el sistema, sin relación con el entorno, para estudiar los elementos que lo forman, su organización y la estructura de sus relaciones internas.

4.1. Organización del sistema

Siguiendo los criterios propuestos al considerar el conjunto del Sector, podemos introducirnos en el sistema alcanzando niveles más profundos de descomposición.

Con ese hilo conductor podemos avanzar en el interior del sistema utilizando como referencia una estructura arborescente y jerarquizada con tres niveles de desarrollo (figura 57):

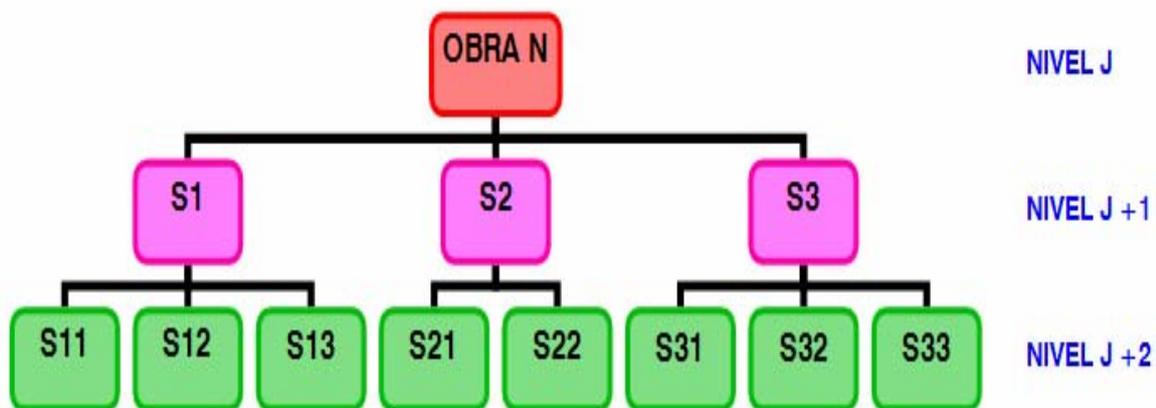


FIGURA 57. Organización del sistema

Nivel J

- Sistema Obra de Construcción (S)

Nivel J + 1

- Subsistema Proyecto (S1)
- Subsistema Contratación (S2)
- Subsistema Ejecución (S3)

Nivel J +2

SUBSISTEMA PROYECTO (S1)

SUBSISTEMA CONTROLADOR (S11)

Formado principalmente por los órganos de control de la entidad promotora. Su tarea consistirá en velar por el cumplimiento de la finalidad del sistema; en este caso, la realización de un Proyecto que recoja las restricciones planteadas por el promotor en el encargo.

SUBSISTEMA DISEÑADOR (S12)

En el seno de este subsistema el equipo de diseño y sus colaboradores elaborarán los documentos descriptivos de la obra que se pretende realizar, utilizando como referencia el programa de necesidades del promotor, las normas urbanísticas, las características del suelo y también sus propios criterios. El conjunto de transformaciones da lugar a outputs con diferentes grados de terminación: anteproyectos, proyectos básicos y proyectos de ejecución.

SUBSISTEMA PRESUPUESTACIÓN (S13)

El objetivo de este subsistema es determinar el coste esperado de la construcción diseñada. Para conseguirlo utiliza los datos contenidos en los documentos del Proyecto: memorias, pliegos de prescripciones técnicas y planos, aparte de utilizar la información relativa a precios procedente de los mercados de productos (obras) y de factores productivos (materiales, subcontratas, mano de obra...)

SUBSISTEMA CONTRATACIÓN⁹⁰ (S2)

SUBSISTEMA EJECUCIÓN (S3)

SUBSISTEMA CONTROLADOR (S31)

Formado principalmente por los encargados de la dirección técnica, responsables de que la obra se ajuste fielmente al proyecto redactado. También podrían intervenir, con funciones de asesoramiento, los órganos de control de la entidad promotora, los miembros del equipo de diseño y los técnicos asignados por la empresa constructora.

SUBSISTEMA EJECUCIÓN (S32)

Este subsistema recoge todos los procesos de producción que conducen a la realización de la obra.

⁹⁰ Aunque aparece en la estructura no se analizará este subsistema ya que sus implicaciones caen fuera del análisis de la gestión de residuos en obra.

Por lo tanto, desde un enfoque productivo debe ser éste el subsistema principal del sistema.

SUBSISTEMA VALORACIÓN (S33)⁹¹

4.2. Estructura interna del sistema

Para explicar la estructura de relaciones internas del sistema, dividiremos éste en los tres subsistemas pertenecientes al nivel J + 1 y analizaremos cada uno de ellos individualmente, profundizando en las relaciones de nivel J + 2.

4.2.1. Subsistemas de nivel J + 1

La estructura relacional del nivel J + 1 se concreta mediante el grafo de la figura 58. En él se representan los subsistemas pertenecientes al citado nivel y el conjunto de interacciones que los caracterizan.

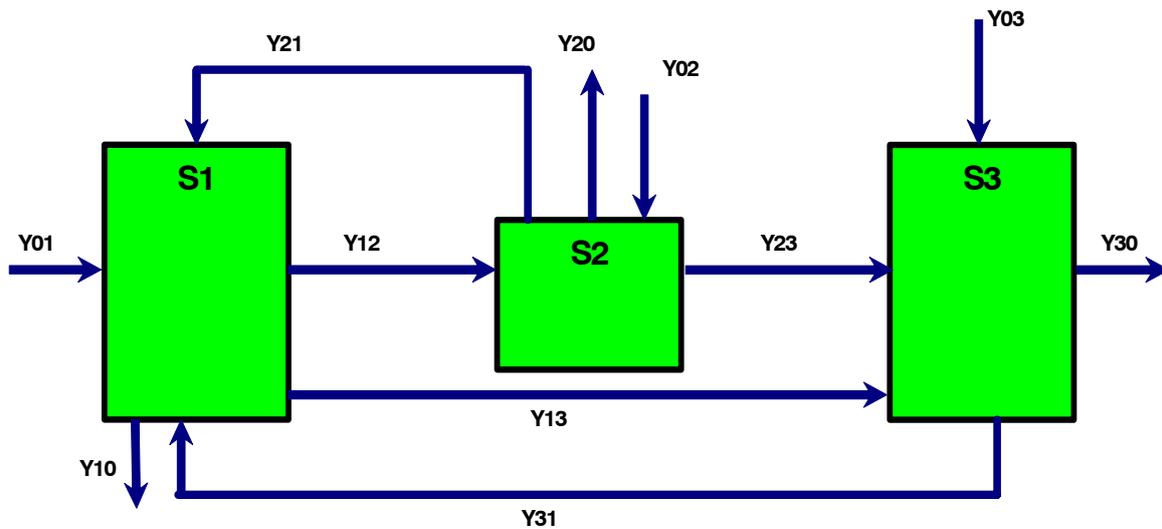


FIGURA 58. Estructura interna de subsistemas de nivel J + 1

Aunque se hayan representado los tres subsistemas, para nuestra investigación el subsistema S2 no interviene, por lo que únicamente haremos referencia a las relaciones que afectan a S1 y S3.

A continuación se definen las relaciones contenidas en el grafo anterior desde el punto de vista del subsistema proyecto y ejecución:

⁹¹ No analizaremos este subsistema por hacer referencia a las certificaciones de obra, una fase que desde el punto de vista productivo no interviene.

Y01: Entradas en el subsistema Proyecto procedentes del entorno (promotores, equipos de diseño, características del suelo...).

Y03: Entradas en el subsistema Ejecución procedentes del Entorno (empresa constructora, factores productivos...).

Y10: Salidas al entorno: ejemplares del proyecto dirigidos a los organismos de control externo (por ejemplo, Colegios de Arquitectos).

Y13: flujo informativo hacia la Ejecución, formado por el conjunto de documentos que componen el modelo normativo (proyecto) que servirá de referencia para realizar la futura construcción.

Y30: la obra ejecutada será el OUTPUT final del subsistema Ejecución.

Y31: flujo de retroacción entre la Ejecución y el Proyecto. A través de este canal es posible ajustar los sucesos que se produzcan durante el proceso de Ejecución y que no estén recogidos en el proyecto.

4.2.1. Subsistemas de nivel J +2

Avanzando en el intento de descripción, descenderemos un escalón en el nivel jerárquico hasta alcanzar los subsistemas de nivel J +2. Estudiaremos los subsistemas Proyecto y Ejecución.

A. SUBSISTEMA PROYECTO

Estructura del grafo (estructura relacional):

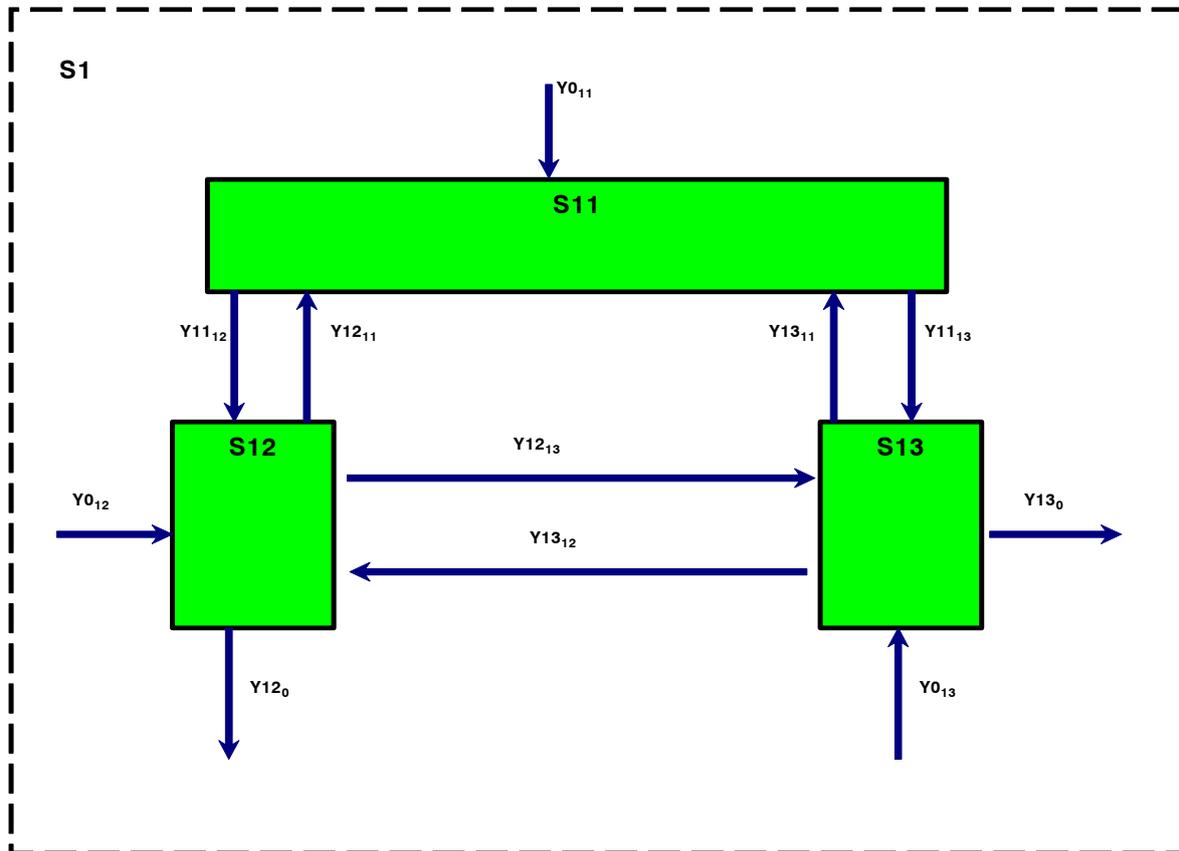


FIGURA 59. Grafo subsistema S1 Proyecto

S11: subsistema CONTROLADOR. Formado principalmente por los órganos de control de la entidad promotora.

S12: subsistema DISEÑADOR. Elaboración de documentos prescriptivos.

S13: subsistema PRESUPUESTACIÓN.

$Y_{0,11}$: Flujos informativos que nutren de referencias al subsistema Controlador (por ejemplo, situación de la oferta y demanda de productos).

$Y_{0,12}$: Entradas en el equipo de diseño (por ejemplo, deseos del promotor, planes urbanísticos...).

$Y_{0,13}$: Flujos informativos relacionados con la situación del nivel de precios en los diferentes mercados.

$Y_{11,12}$ - $Y_{12,11}$: Flujos interactivos entre el promotor y el equipo de diseño, donde se analizan posibles desviaciones y se establecen acciones correctoras.

Y11₁₃-Y13₁₁: Flujos interactivos relativos al análisis de costes.

Y12₀: Salidas de los resultados del proceso de diseño hacia las instituciones de control.

Y12₁₃-Y13₁₂: Flujos interactivos de información mutua que permiten ajustar el presupuesto al diseño.

Y13₀: Salida que completa el producto del subsistema Presupuestación, esto es, el Proyecto.

PROCESO INTERNO DE TRANSFORMACIONES

Conjunto de transformaciones que se desarrollan en este sistema.

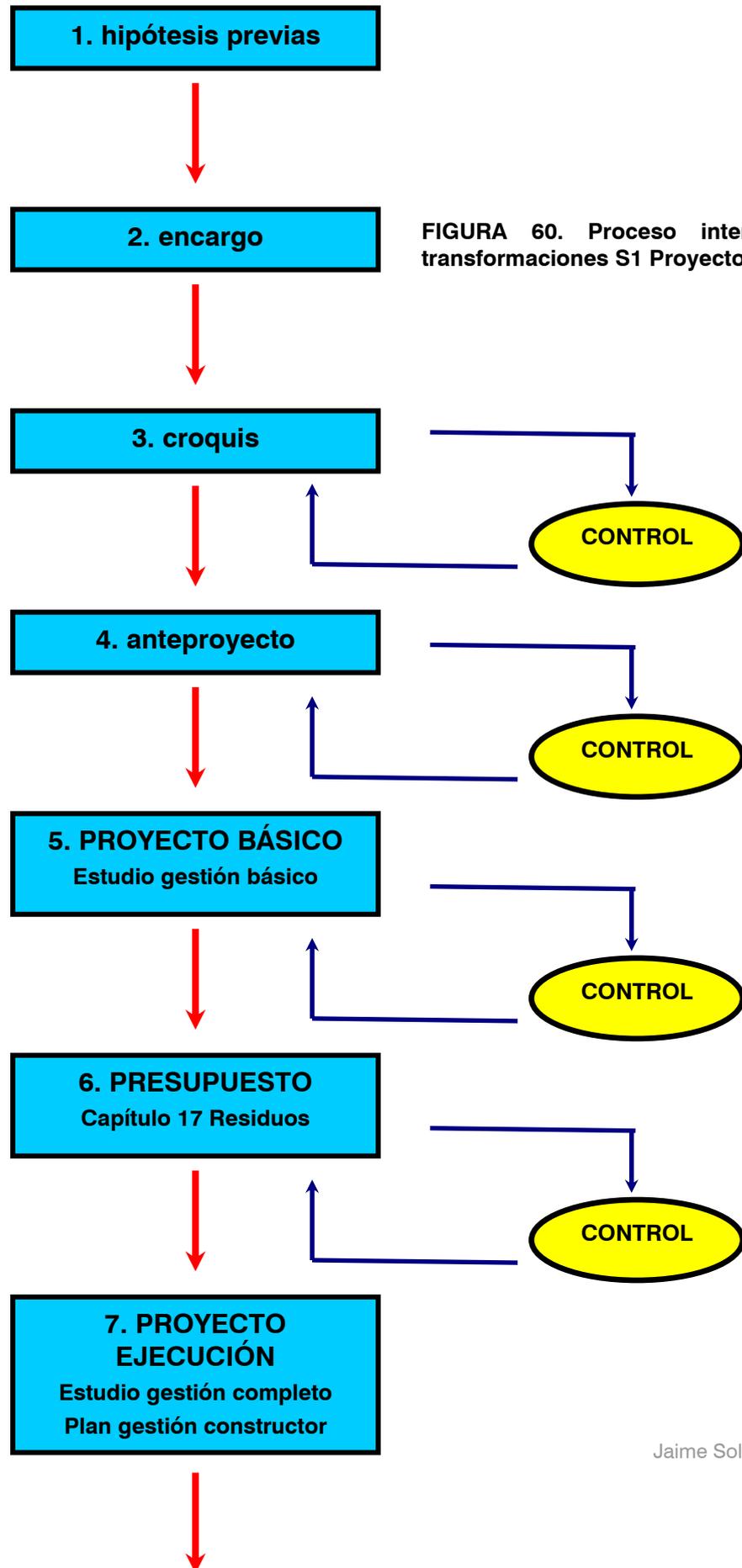


FIGURA 60. Proceso interno de transformaciones S1 Proyecto

B. SUBSISTEMA EJECUCIÓN

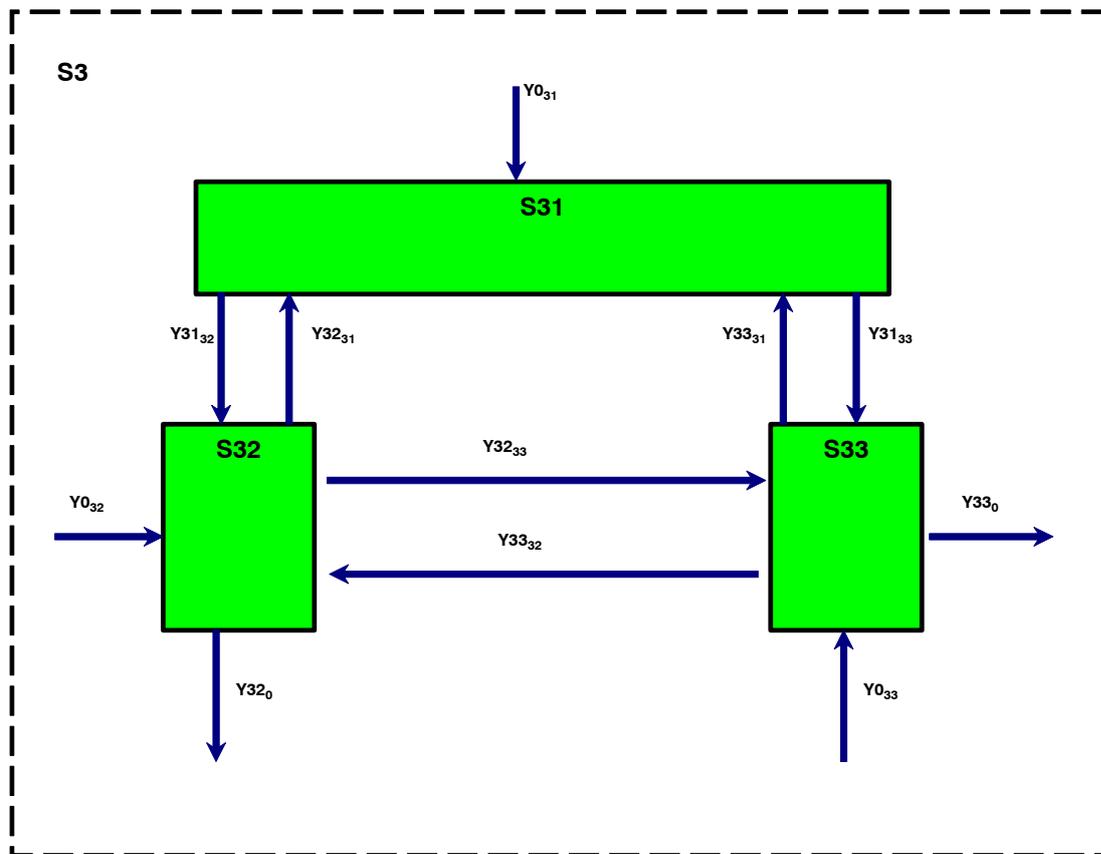


FIGURA 61. Grafo subsistema S3 Ejecución

S31: subsistema CONTROLADOR

S32: subsistema EJECUCIÓN

S33: subsistema VALORACIÓN

$Y_{0_{31}}$: Flujos informativos procedentes de los subsistemas normativos externos (por ejemplo, Colegios Profesionales, órganos de la Administración, normas tecnológicas...).

$Y_{0_{32}}$: Entrada del solar y de la empresa constructora en el sistema. Flujos informativos externos (precios de factores), internos (Proyecto, normas complementarias procedentes del equipo de diseño...).

$Y_{0_{33}}$: Flujos informativos externos relacionados con los costes. Flujos informativos internos (presupuesto del Proyecto, contrato de obras...).

$Y_{31_{32}}$ - $Y_{32_{31}}$: Flujos interactivos entre el equipo de dirección y el subsistema Ejecución. Permiten analizar posibles desviaciones entre el Proyecto y la obra realizada, y en su caso, introducir acciones correctoras.

$Y_{31_{33}}$ - $Y_{33_{31}}$: Flujos interactivos entre la dirección de obra y los técnicos de la empresa constructora.

Y32₀: Salida del sistema de la Obra terminada. Este flujo físico marca el final de la vida del sistema.

Y32₃₃-Y33₃₂: Flujos interactivos de información.

Y33₀: Flujos informativos hacia el Promotor que expresan el importe de las certificaciones de obra.

PROCESO INTERNO DE TRANSFORMACIONES

Para definir el proceso interno de transformaciones del subsistema ejecución nos basaremos en la clasificación sistemática por procesos⁹² y también en como dicha clasificación estructura la retirada de residuos en obra.

La clasificación sistemática por procesos define los procesos de ejecución que se llevan a cabo en una obra. Siguen, en la medida de lo posible, un orden cronológico, aunque es cierto que muchos procesos se solapan, o incluso se dan a lo largo de toda la obra (por ejemplo, los procesos de retirada de residuos tienen asignado el código 27 y sin embargo ocurren durante todo el proceso constructivo).

Después también haremos un análisis de los residuos generados en obra.

Para obra nueva, la clasificación sistemática por procesos sería la siguiente:

Código	Concepto
01	CENTROS DE PRODUCCIÓN
02	ACTUACIONES PREPARATORIAS
03	DEMOLICIONES Y DESMONTADOS
04	ACONDICIONAMIENTOS DE TERRENOS
05	CIMENTACIONES
06	SANEAMIENTOS
07	ESTRUCTURAS
08	CERRAMIENTOS
09	CUBIERTAS
10	PAREDES INTERIORES
11	INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN
12	INSTALACIONES DE ELECTRICIDAD
13	INSTALACIONES DE FONTANERÍA
14	INSTALACIONES DE GASES Y LICUADOS
15	INSTALACIONES DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS
16	INSTALACIONES DE CONTROL Y SEGURIDAD
17	INSTALACIONES DE TELECOMUNICACIONES

⁹² Tesis Doctoral "Nuevo modelo de presupuestación de obras basado en procesos productivos", realizada por M^a Victoria de Montes Delgado, bajo la tutela de Antonio Ramírez de Arellano Agudo.

- 18 INSTALACIONES DE TRANSPORTE
- 19 INSTALACIONES SOLARES
- 20 INSTALACIONES DE RETIRADA DE RESIDUOS
- 21 OTRAS INSTALACIONES
- 22 CARPINTERIAS**
- 23 REVESTIMIENTOS**
- 24 AMUEBLAMIENTOS**
- 25 TRABAJOS EXTERIORES
- 26 TERMINACIONES
- 27 RETIRADAS

Los procesos en negrita son los que consideramos que comprenden el subsistema ejecución.

Resumiendo, nuestro subsistema ejecución lo compondrían, por orden cronológico aproximado, los siguientes procesos:

- 0. AUTORIZACIONES ADMINISTRATIVAS
- 1. ACTUACIONES PREPARATORIAS
- 2. DEMOLICIONES Y DESMONTADOS
- 3. ACONDICIONAMIENTOS DE TERRENOS
- 4. CIMENTACIONES
- 5. SANEAMIENTOS
- 6. ESTRUCTURAS
- 7. CERRAMIENTOS
- 8. CUBIERTAS
- 9. PAREDES INTERIORES
- 10. INSTALACIONES
- 11. CARPINTERIAS
- 12. REVESTIMIENTOS
- 13. AMUEBLAMIENTOS
- 14. OBRA TERMINADA

Por lo tanto, el proceso interno de transformaciones será

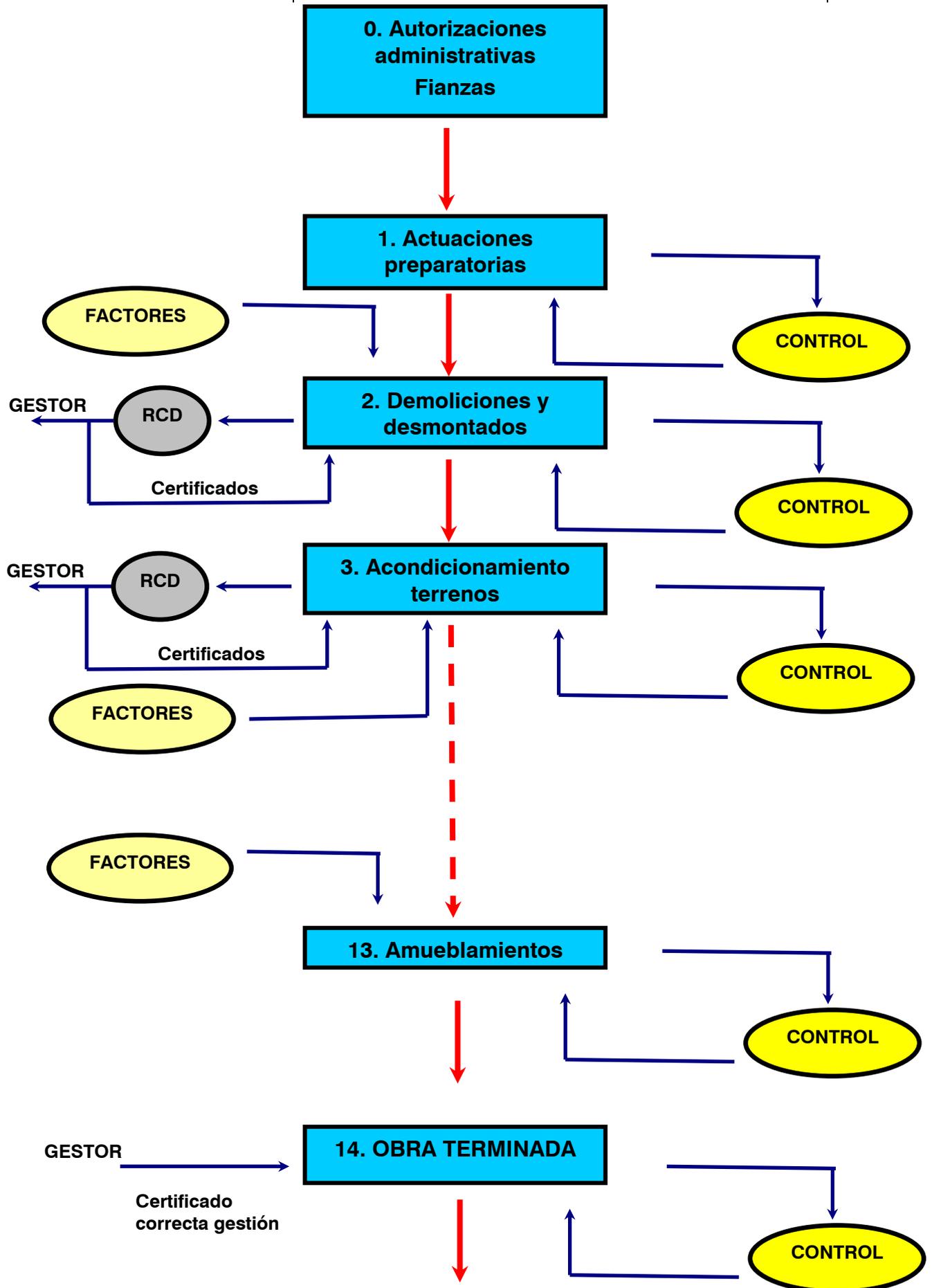


FIGURA 62. Proceso interno de transformaciones S3 Ejecución

Y para la gestión de los residuos los procesos se podrían agrupar en función del tipo de material a reciclar. Esa clasificación del nuevo modelo de presupuestación en parte coincide con la que se está realizando en el BCCA para el capítulo 17 "Residuos".

27 RETIRADAS⁹³

2710 RESIDUOS

271001	AISLAMIENTOS
271010	HORMIGONES, MATERIALES PÉTREOS Y CERÁMICOS
271020	MADERAS, PAPELES, CARTONES, SINTÉTICOS Y VIDRIOS
271030	METALES Y ALEACIONES
271040	PRODUCTOS ALQUITRANADOS
271050	TIERRAS
271070	PROCESOS MIXTOS
271080	PROCESOS ESPECIALES
271090	VARIOS

De todos los subsistemas del sistema OBRA habría que considerar los que realmente afectan a la gestión de los residuos. En nuestro caso serían el proyecto y la ejecución⁹⁴.

⁹³ Clasificación por procesos. "Nuevo modelo de presupuestación de obras basado en procesos productivos"

⁹⁴ Hiposistema: formado por aquellos subsistemas que conforman la estructura del entorno específico del sistema que contendrá el modelo del cuerpo central de la investigación.

5. Jerarquía de finalidades

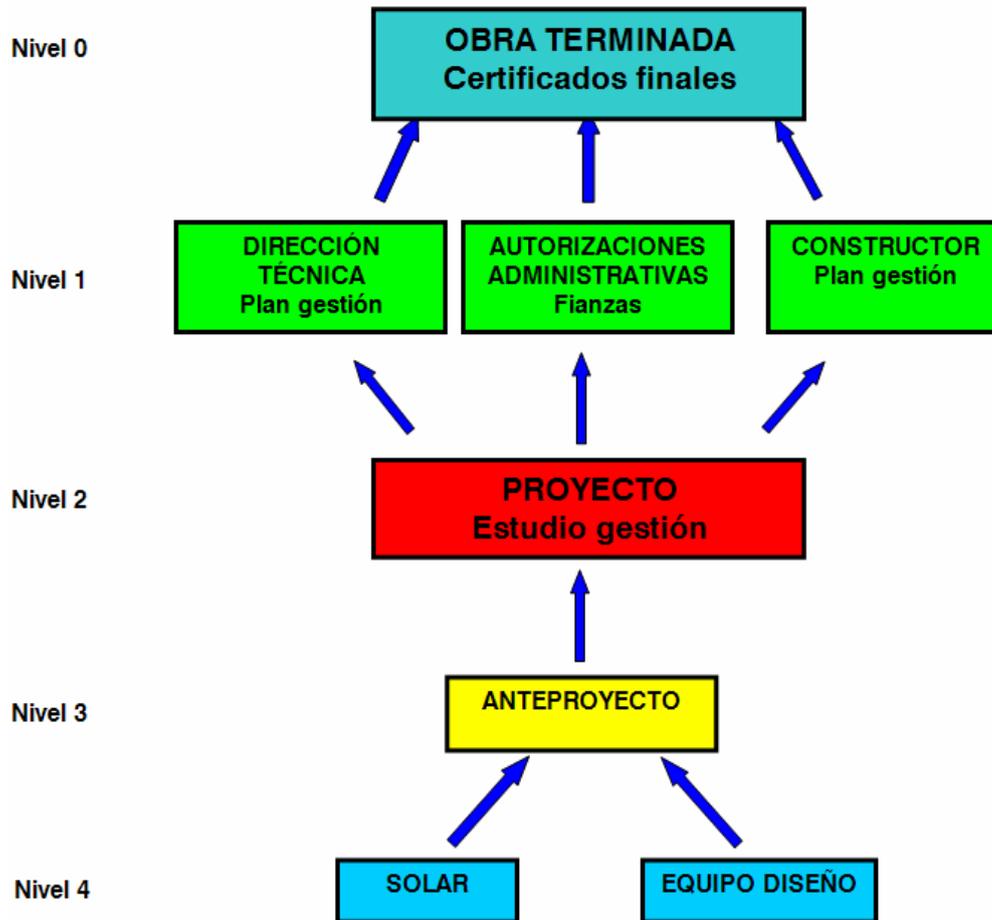


FIGURA 63. Jerarquía de finalidades

El Sistema Obra nace para cumplir la misión de CONSTRUIR UNA OBRA. Además una vez cumplida esa finalidad, desaparece. Sin embargo, en éste como en la mayoría de los sistemas finales, existen otros objetivos cuyo cumplimiento es necesario para alcanzar la meta propuesta.

El conjunto de esos fines se puede ordenar en niveles jerárquicos, atendiendo a la prioridad temporal en su ejecución, de forma que conseguir cada objetivo intermedio se convierte en una etapa de la evolución que conduce a la finalidad fundamental.

La interpretación de cada objetivo, analizado desde el nivel inferior al superior sería la siguiente:

Nivel 4

Solar

El promotor obtendrá un solar que cumpla los requisitos propuestos

Equipo de diseño

De él nace la idea que, convenientemente desarrollada, dará lugar al proyecto que servirá de base para ejecutar la obra.

Nivel 3

Anteproyecto

Cumpliendo las restricciones, hipótesis y necesidades del promotor, el Diseñador redactará un anteproyecto en el que se exponen los aspectos fundamentales de las características generales de la obra: funcionales, formales, constructivas y económicas.

Nivel 2

Proyecto

El proyecto de la obra, como objetivo del sistema, se elabora en dos fases:

1. Proyecto básico. Es la fase del proyecto en la que se definen de modo preciso las características generales de la obra. Con la aprobación del Proyecto MMA, en dicho proyecto tiene que aparecer un Estudio básico de gestión de residuos ya citado anteriormente.
2. Proyecto de ejecución. Es la fase del trabajo que desarrolla el proyecto básico, con la determinación completa de detalles y especificaciones de todos los materiales, elementos, sistemas constructivos y equipos. Debe contener un Estudio completo de gestión de residuos, ya reseñado anteriormente.

Nivel 1

Constructor

Agente encargado de la ejecución de la obra, y responsable del Plan de gestión de residuos de la obra, en el cual se reflejará como llevará a cabo el constructor las obligaciones que le incumban en relación con los RCD. El plan deberá ser aprobado por la dirección facultativa.

Dirección técnica

La ejecución de la obra de acuerdo con el proyecto requiere la participación obligada de técnicos. Además, la dirección técnica responsable en obra deberá aprobar el plan de gestión de residuos que tiene que ejecutar el constructor.

Autorizaciones administrativas

Terminado el proyecto, antes de iniciarse la construcción, es necesario conseguir ciertas autorizaciones administrativas como podrían ser las licencias de obras otorgadas por el Ayuntamiento correspondiente.

Ahora, bien con la nueva legislación, es obligatorio depositar determinadas fianzas en los

Ayuntamientos para que se otorgue la licencia. El procedimiento que debería llevarse a cabo sería el siguiente:

- El productor (promotor) encarga el proyecto.
- El proyectista elabora el Estudio de Gestión de RCD.
- El productor solicita licencia y deposita la fianza.
- El productor contrata al poseedor (constructor).
- El poseedor entrega los RCD al un transportista autorizado y paga.
- El transportista entrega los RCD al gestor autorizado.
- El gestor autorizado realiza tareas y cobra del poseedor.
- El gestor autorizado entrega certificación al poseedor.
- El poseedor entrega la certificación al productor y cobra.
- El productor entrega el certificado y recupera la fianza.

Los documentos mostrados en las figuras 64 y 65 son *fichas de evaluación de RCD* que rellenan los ayuntamientos de la Mancomunidad de Los Alcores para fijar las fianzas a depositar. Mientras no se deposite la fianza no se concede la licencia de obra.

Nivel 0

Obra terminada

Supone la culminación del proceso, y por lo tanto, la FINALIDAD FUNDAMENTAL del sistema. La consecución de los objetivos y subobjetivos de niveles inferiores puede tener diferentes repercusiones en el desarrollo del Sistema.



**Ayuntamiento de
Alcalá de Guadaíra**

FICHA DE EVALUACIÓN DE RCD

Expediente:	Fecha:
-------------	--------

DATOS DEL PROMOTOR			
Nombre o Razón Social:	Dirección:		
CIF:	Municipio:	Prov.:	
CP:	Fax:	E-mail:	
Teléf.:			

PERSONA AUTORIZADA			
Nombre:	Dirección:		
CIF:	Municipio:	Prov.:	
CP:	Fax:	E-mail:	
Teléf.:			

DATOS DE LA OBRA	
Denominación:	
Localización:	
C.P. Donde se ubica la obra:	→

DATOS DE LA EMPRESA CONSTRUCTORA (si procede)			
Nombre o Razón Social:	Dirección:		
CIF:	Municipio:	Prov.:	
CP:	Fax:	E-mail:	
Teléf.:			

Comunicación de importe de la fianza			
Nombre:	Dirección:		
CIF:	Municipio:	Prov.:	
CP:	Fax:	E-mail:	
Teléf.:			

(Cumplimentar el medio que proceda para enviar la comunicación)

A cumplimentar por el Ayuntamiento

Una vez estudiada la documentación aportada se estima que el volumen de residuos producidos en la obra citada se desglosa de la siguiente forma:

Volumen de RCD mixto (m³)

Volumen de tierras (m³)

Fijándose una fianza de €

Por el importe arriba indicado ha quedado depositada en el Ayuntamiento la fianza a que hace referencia el artículo 8.4. de la Ordenanza Reguladora de la Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición de Alcalá de Guadaíra (B.O.P. De la Provincia de Sevilla núm. 31 de 8 de febrero de 2005)

Fecha:
Firma y sello

Plaza del Duque nº 1 - 41500 - Alcalá de Guadaíra. - Tel. 954 979 152 - Fax 954 979 224 - E-mail: urbanismo@alcaladeguadaira.org

FIGURA 64. Ficha de evaluación de RCD del Ayuntamiento de Alcalá de Guadaíra



FICHA DE EVALUACIÓN DE RCD's

Expediente:				Fecha:					
DATOS DEL PROMOTOR									
Nombre o Razón Social:									
CIF:				Dirección:					
CP:				Municipio:					
Prov.:				Prov.:					
Teléf.:				Fax:					
E-mail:									
PERSONA AUTORIZADA									
Nombre:									
CIF:				Dirección:					
Teléf.:				Fax:					
E-mail:									
DATOS DE LA OBRA									
Denominación:									
Localización:									
C.P. Donde se ubica la obra:									
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>→</td> <td></td> </tr> </table>								→	
	→								
DATOS DE LA EMPRESA CONSTRUCTORA (si procede)									
Nombre o Razón Social:									
CIF:				Dirección:					
CP:				Municipio:					
Prov.:				Prov.:					
Teléf.:				Fax:					
E-mail:									
Comunicación de importe de fianza									
Nombre:									
Teléf.:				Fax:					
E-mail:									
(Cumplimentar el medio que proceda para enviar la comunicación)									

A cumplimentar por LIPASAM

Una vez estudiada la documentación aportada se estima que el volúmen de residuos producidos en la obra citada se desglosa de la siguiente forma:

Volumen de RCD mixto (m3)

Volumen de tierras (m3)

Fijándose una fianza de €

Por el importe arriba indicado ha quedado depositada en LIPASAM la fianza a que hace referencia el artículo 78 de la Ordenanza de Limpieza Pública y Residuos Urbanos de Sevilla (B.O.P. De Sevilla núm. 112 de 17 de Mayo de 2003)

Fecha:	<input type="text"/>
Firma y sello	

FIGURA 65. Ficha de evaluación de RCD LIPASAM

Conclusiones

Conclusiones

Este trabajo fin de master pretende ser el inicio de la investigación que desembocará en la tesis dedicada a investigar sobre modelos de cuantificación de residuos en la construcción.

Este trabajo previo ha permitido en primer lugar, el análisis profundo de la teoría de sistemas, donde se ha realizado una aproximación al estado de la cuestión referido a la teoría de sistemas en general y a la dinámica sistémica en particular.

Posteriormente se han revisado dos modelos de dinámica sistémica que se consideraron de interés por varias razones. Como aspecto importante, ambos modelos habían sido desarrollados en el MIT, la cuna de la dinámica sistémica, bien por los pioneros, como Forrester, bien por discípulos suyos. También interesó el hecho de que el modelo de dinámica urbana planteaba modelos para las ciudades desde el punto de vista sistémico, lo que de alguna manera permitía confrontar las teorías urbanísticas desde la arquitectura y desde la teoría de sistemas.

Aunque se observa que en los análisis de Forrester predomina la aproximación cercana a la ingeniería, sí se establecen puntos de contacto interesantes entre las dos teorías. Respecto al modelo de crecimiento mundial, permitía revisar la dinámica sistémica de las situaciones actuales como la del cambio climático, y comprobando que muchas de las herramientas de dinámica de sistemas siguen vigentes. Además, el modelo de crecimiento nos introduce de lleno en toda la complejidad sobre lo sostenible, planteando posibles líneas de seguimiento que hemos considerado de gran interés.

Con ese bagaje a cuestas, hemos querido iniciar en este master el trabajo de investigación de tesis, proponiendo un modelo del sistema de obra, basado en el ya desarrollado por el investigador D. Antonio Ramírez de Arellano Agudo e incorporando aquellos aspectos que no recogía el modelo sobre la gestión de residuos en obra. Este modelo ha procurado incorporar todas las novedades que desde el punto de vista práctico pueden afectar a la gestión de residuos, lo que ha obligado a la revisión de toda la normativa existente en dicho campo. Como la referencia marco ha de ser la normativa nacional, el próximo real Decreto que regulará la gestión de residuos, cuya aprobación se espera para los próximos meses, y será la base sobre la que debemos trabajar.

Una vez fijado el sistema a analizar, la futura investigación debe profundizar en él para diseñar un modelo para cuantificar los residuos de construcción en las obras.

Glosario

Glosario

ALMACENAMIENTO: El depósito temporal de residuos, con carácter previo a su valorización o eliminación, durante el tiempo establecido en la normativa básica u otro inferior fijado reglamentariamente para cada tipo de residuo y operación.

AUTOPOIESIS: Patrón de vida. Conjunto de relaciones entre procesos de producción.

CAPACIDAD DE CARGA: Número de personas que en las circunstancias actuales podrían sostenerse en el planeta durante un largo espacio de tiempo sin deteriorar la productividad global de la tierra.

CICLO DE REALIMENTACIÓN POSITIVO: Cadena de relaciones de causa y efecto cerrada en sí misma que genera un cambio que se autorrefuerza.

COLAPSO: Estado que implica la erosión irreversible del medio ambiente. Origina la contracción de la huella ecológica.

CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE: Aquélla que, desde planteamientos respetuosos y comprometidos con el medio ambiente, utiliza adecuadamente el agua y los distintos tipos de energía; selecciona desde el proyecto y aplica eficientemente durante la obra recursos, tecnologías y materiales; evita los impactos ambientales; gestiona los residuos que genera en su ciclo de vida; busca un mantenimiento y conservación adecuados del patrimonio construido; reutiliza y rehabilita siempre que es posible, es rentable y, además y finalmente, resulta más accesible, confortable y saludable.

DESARROLLO SOSTENIBLE: El que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

ELIMINACIÓN: Todo procedimiento dirigido, bien al vertido de los residuos o bien a su destrucción, total o parcial, realizado sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente.

EXTRALIMITACIÓN: Superación del umbral de crecimiento sostenible.

ESPECIES Y SERVICIOS DEL ECOSISTEMA: Elementos sin los que no puede plantearse la vida en la tierra tal como nosotros la conocemos. Algunos ejemplos podrían ser la depuración del agua y del aire, la absorción y el almacenamiento del agua, la descomposición, desintoxicación y secuestro de residuos...

FRONTERA: Límite (físico o no) de nuestro sistema.

GAIA: La Tierra Viva. Teoría que considera que el Planeta Tierra es un sistema autoorganizador vivo.

GESTIÓN: La recogida, el almacenamiento, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas actividades, así como la vigilancia de los lugares de depósito o vertido después de su cierre.

GEOMETRÍA FRACTAL: Los patrones característicos se encuentran repetidamente en escalas descendentes, de modo que sus partes, en cualquier escala, son semejantes en forma al conjunto.

HOMEOSTASIS: Conjunto de funciones que permite mantener todo un conjunto de factores del medio interno entre unos intervalos que se consideran constantes, a pesar de las posibles variaciones del medio externo.

HUELLA ECOLÓGICA: Tierra cultivable + tierra urbana + tierra para neutralizar la emisión de contaminantes.

ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO: Media aritmética del índice de esperanza de vida, del índice de educación y el índice del Producto Interior Bruto.

ISOMORFO: Dos sistemas matemáticos son isomorfos cuando puede establecerse una correspondencia biunívoca entre los elementos de ambos, y cuando toda relación definida entre los elementos de uno cualquiera de ellos también se cumple entre los elementos correspondientes del otro. Dos sistemas son isomorfos si ambos pueden representarse por medio del mismo modelo matemático.

MATERIA PRIMA SECUNDARIA: Los objetos o sustancias residuales de un proceso de producción, transformación o consumo, que se utilicen de forma directa como producto o materia prima en un proceso que no sea de valorización, en el sentido definido por la normativa sobre residuos y sin poner en peligro la salud humana, ni causar perjuicios al medio ambiente.

MODELO: Representación de un determinado aspecto de la realidad en un lenguaje específico. Un objeto M es un modelo de X para un observador O si O puede emplear M para responder a cuestiones que le interesan acerca de X.

PARADIGMA: Conjunto de realizaciones científicas universalmente reconocidas y que durante un cierto tiempo proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica.

PREMIUM HOUSING: Viviendas para trabajadores de alta cualificación.

RCD: residuo de construcción y demolición. "Cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de "Residuo" incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, se genere en una obra de construcción y demolición.

SLUM HOUSING: Viviendas de baja calidad.

SISTEMA: Modelo de naturaleza general, esto es, una representación conceptual de ciertos caracteres más bien universales de entidades observadas. Conjunto de elementos relacionados entre sí y con el medio ambiente.

UNDEREMPLOYED: Desempleados y trabajadores de bajo nivel.

VALORIZACIÓN: Recuperación o reciclado de determinadas sustancias/materiales contenidas en los residuos, incluyendo reutilización directa, reciclado e incineración con aprovechamiento energético.

VARIABLES DE ESTADO: Constituyen aquel conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema.

VARIABLES DE FLUJO: Representan la variación de una variable de estado.

VISIÓN HOLÍSTICA: Ver el objeto como un todo funcional y entender consecuentemente la interdependencia de las partes.

Bibliografía

Bibliografía

Avance del Plan especial de indicadores de sostenibilidad ambiental de la actividad urbanística de Sevilla. Gerencia de Urbanismo. Sevilla, Enero 2007.

Borrador de Real Decreto por el que se regula la correcta gestión de RCD. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, Octubre 2006.

Casino mundial. Claves de la globalización económica. Wayne Ellwood. Intermón Oxfam. Barcelona, 2003.

Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Vivienda. Madrid, 2006.

Estrategia Española de Medio Ambiente Urbano. Ministerio de Medio Ambiente. 2006.

La ciudad hojalde. Carlos García Vázquez. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, 2004.

La teoría de sistemas al servicio del análisis de presupuesto de obras. Antonio Ramírez De Arellano Agudo. Editorial Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla. Sevilla, 1989.

La trama de la vida. Fritjof Capra. Editorial Anagrama. Barcelona, 1996.

Ley de gestión integral de la calidad ambiental. Junta de Andalucía. Sevilla, Julio 2007.

Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad. Donella H.Meadows, Dennis L.Meadows. Fondo de Cultura Económica. México, 1973.

Los límites del crecimiento 30 años después. Donella Meadows, Jorgen Randers, Dennis Meadows. Galaxia Gutenberg. Barcelona, 2006.

Máquinas, sistemas y modelos: un ensayo sobre sistemas. Javier Aracil. Editorial Tecnos. Madrid, 1986.

Nuevo modelo de obras basado en procesos productivos. María Victoria de Montes Delgado. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla. Sevilla, 2007.

Ordenanza Marco de la Mancomunidad de Los Alcores. Boletín Oficial de la Provincia de Sevilla. Sevilla, Noviembre 2003.

Programa de acciones técnicas para fomentar la valorización, minimización y selección de residuos originados en las obras de construcción y demolición. Instituto de Tecnología de la Construcción. Barcelona, 1998.

Retirada selectiva de residuos: Modelo de Presupuestación. Antonio Ramírez de Arellano Agudo y varios coautores. Editorial Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla. Sevilla, 2002.

Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones. L. Von Bertalanffy. Fondo de Cultura Económica. México, 1976

Tendencias en la teoría general de sistemas. Ludvig Von Bertalanffy, W. Ross Ashby, G. M. Weinberg. Editorial Alianza. Madrid, 1981.

Urban dynamics. Jay W. Forrester. MIT Press . Cambridge, Massachussets. 1970

Fuentes bibliográficas de las figuras

Casino mundial. Claves de la globalización económica. Wayne Ellwood. Intermón Oxfam. Barcelona, 2003.

Figuras 50 y 51.

La trama de la vida. Fritjof Capra. Editorial Anagrama. Barcelona, 1996.

Figura 5

Los límites del crecimiento 30 años después. Donella Meadows, Jorgen Randers, Dennis Meadows. Galaxia Gutenberg. Barcelona, 2006.

Figuras 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53 y 54.

Máquinas, sistemas y modelos: un ensayo sobre sistemas. Javier Aracil. Editorial Tecnos. Madrid, 1986.

Figuras 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19.

Urban dynamics. Jay W. Forrester. MIT Press . Cambridge, Massachussets. 1970

Figuras 20, 21, 22, 23, 25, 26 y 27.