

## Las jerarquías.

Introducción.

Una aproximación al concepto de jerarquía.

La primera definición.

Las jerarquías estructurales en la ciencia.

Tres nociones distintas, pero relacionadas.

Jerarquía de estratos.

Jerarquía multicapa de toma de decisiones.

Jerarquía de organización.

Una formalización matemática.

Principios de la realidad jerárquica.

Importancia del concepto de jerarquía.

Construcción de complejidad

Comprensión de complejidad.

Procesamiento de información.

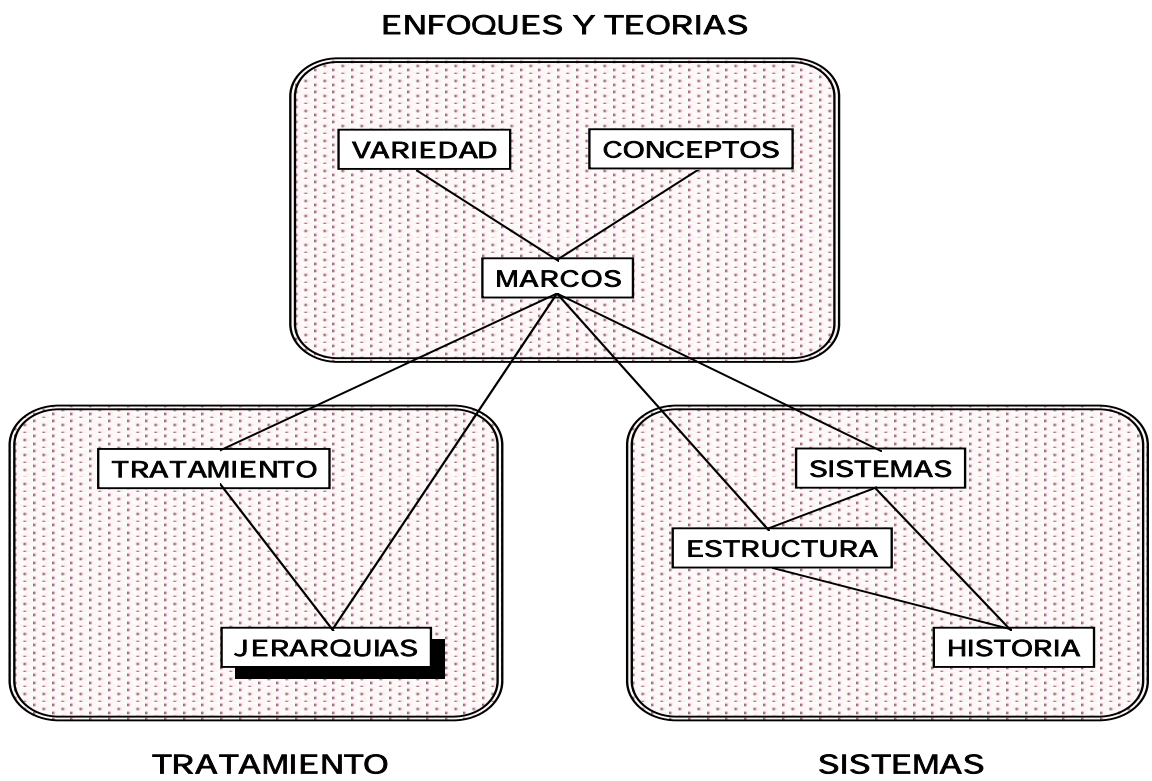
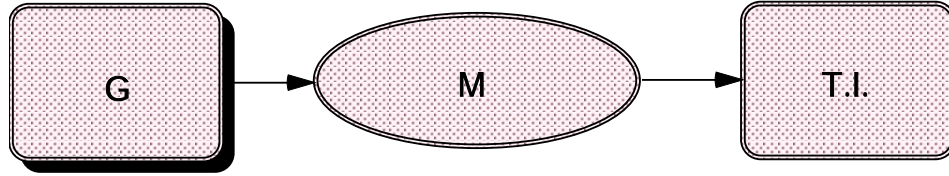
Resumen.

Bibliografía.

*Los sistemas que plantean problemas de gran complejidad no se prestan a una descripción que a la vez sea suficientemente detallada y comprensible en su totalidad por un observador. La aproximación jerárquica nos permite descomponer el sistema complejo en niveles, cada uno de una complejidad menor, y nos da una estructura para entender el conjunto.*

*Pero no sólo es útil el concepto de jerarquía a la hora de describir un sistema. También es una herramienta adecuada para ayudar a la toma de decisiones, o a la organización. Esto es debido, entre otras cosas, a las ventajas que aporta en la construcción o comprensión de la complejidad, y en el proceso de información.*

*La jerarquía, como herramienta, puede considerarse como un potente ejemplo de filtro de variedad, cuyo uso, además, está muy extendido en las ciencias.*



## 1. Introducción.

Podemos decir que, "casi por definición, los sistemas verdaderamente complejos escapan a una descripción completa y detallada" [Mesarovic y Macko, 1969]. El problema es que si queremos estudiar el sistema con gran detalle, llegamos a una situación donde "los árboles no nos dejan ver el bosque", donde perdemos por completo la visión de conjunto, y con ella la comprensión del sistema como un todo. Por otra parte, si intentamos abordarlo desde el punto de vista más general, buscando un modelo "sencillo", que sea comprensible, hemos de dejar de lado los detalles, lo que en un sistema complejo es frecuentemente inadmisibile.

Para sortear este callejón aparentemente sin salida, echaremos mano del concepto de jerarquía. Pero no entendiéndolo como un conjunto parcialmente ordenado por una relación de dominación, sino en el sentido más amplio de división de los problemas en niveles de organización [Bunge, 1969]. De esta forma, en cada nivel nos dedicaremos a estudiar todos sus componentes con el detalle necesario, pero con la ventaja de que podemos apoyarnos para ello en una visión "sencilla" del nivel inferior. Así tenemos a la vez el detalle y la visión de conjunto, lo que nos permitirá manejar con mayor facilidad la complejidad del sistema.

Comenzaremos por analizar los aspectos comunes a las distintas formas de entender el concepto de jerarquía. Aparecerá así la idea de estrato, central a la hora de tratar con jerarquías. Simon nos proporcionará la primera definición, basada en la idea de "subsistemas interrelacionados en cada nivel".

Más adelante, Whyte introduce las jerarquías estructurales, concepto clave a la hora de entender cómo se enfrenta la ciencia a los problemas que trata de resolver. Mesarovic y Macko, por su parte, diferencian tres conceptos que aclaran un poco más nuestra idea de jerarquía, según esta idea se aplique a la descripción, a la toma de decisiones o a la organización.

Veremos también una formalización matemática del concepto de jerarquía, para aportar un poco de rigor a las definiciones vistas hasta ese momento. Y se propondrán una ideas (debidas a Wells) sobre cómo se manifiestan las jerarquías en el mundo real. Por último, realizaremos un pequeño estudio que pretende responder a la pregunta de por qué la jerarquía es un modelo de organización tan extendido.

## 2. Una aproximación al concepto de jerarquía.

Para entrar en contacto con la idea de jerarquía de una forma "suave", recurriremos a las opiniones de un filósofo [Grene, 1969]. Dado que la intención es tratar el tema desde un punto de vista lo más científico posible, esta actitud puede parecer extraña. Pero tiene la ventaja de que estas opiniones enlazan muy bien con las ideas intuitivas que cualquier persona suele tener sobre las jerarquías.

Cuando estudiamos los conceptos en que se basan las diferentes ramas del saber, podemos apreciar que el término "jerarquía" aparece con mucha frecuencia. Pero en una primera aproximación da la impresión de que cada uno lo usa con un significado distinto. Así, oímos a los astrofísicos, y nos quedamos con la idea de clasificación por niveles, de acuerdo al tamaño (o a veces, a la densidad media) de los cuerpos. Los biólogos, sin embargo, no parecen preocupados por este tipo de

cuestiones a la hora de establecer sus clasificaciones. Ellos se centran en la búsqueda de una organización donde la disposición de los elementos de un nivel restrinja el comportamiento de esos elementos, favoreciendo la emergencia de nuevas propiedades. Aparece de esta manera el concepto de regulación: la distinción de un nuevo nivel tendrá lugar al manifestarse un nuevo sistema que ejerce algún tipo de control sobre los elementos que lo componen (que serán por su parte miembros del nivel inferior).

Y de esta manera podríamos seguir explorando diversos campos científicos, cada uno con su propio concepto de jerarquía. ¿Es posible, después del panorama con que nos hemos encontrado, descubrir características comunes en todas las interpretaciones de esta palabra?. Si las estudiamos cuidadosamente, veremos que sí: en todas ellas hallamos la idea de una **clasificación en estratos**. Además, esta clasificación se hace según el **rango** de algún conjunto de elementos que caracterizan a los objetos de los que se ocupa. Como acompañante, puede aparecer la idea de **regulación** de unos estratos sobre otros, pero ésta no es esencial para que se hable de jerarquía (por ejemplo, en el caso de los astrofísicos, que consideramos antes, no era relevante).

- NIVEL -4: Corpúsculos (partículas fundamentales).*
- NIVEL -3: Átomos.*
- NIVEL -2: Moléculas.*
- NIVEL -1: Sistemas moleculares.*
  - a. Cristales.*
  - b. Coloides.*
- NIVEL 0: Agregados coloidales y cristalinos.*
  - a. Inorgánicos (minerales, meteoritos,...).*
  - b. Orgánicos (organismos, colonias,...).*
- NIVEL +1: Asociaciones meteoríticas.*
  - a. Chaparrones de meteoros.*
  - b. Cometas.*
  - c. Nebulosas coherentes.*
- NIVEL +2: Sistemas de satélites.*
- NIVEL +3: Estrellas y familias de estrellas.*
- NIVEL +4: Cúmulos estelares.*
- NIVEL +5: Galaxias.*
  - a. Brillantes.*
  - b. Tenues.*
- NIVEL +6: Agregaciones de galaxias.*
- NIVEL +7: Metagalaxia.*
  - a. Cuerpos y sistemas siderales organizados.*
  - b. Cosmoplasma o matriz.*
- NIVEL +8: El universo (complejo espaciotemporal).*

*Fig. 1. Ejemplo de clasificación jerárquica: resumen de la clasificación de los sistemas materiales, debida a Shapley [H. Shapley, 1958].*

Así, en la Astrofísica, el rango en función del cual se realiza la clasificación viene dado por el tamaño de los objetos, mientras que para los biólogos lo determinante es el tipo de propiedades que tienen los elementos de cada estrato. El hecho de que una célula esté en un nivel más bajo que un organismo pluricelular se debe básicamente a las nuevas propiedades que emergen en este último.

Con esto hemos introducido ya la mayor parte de los conceptos que aparecen en el estudio de las jerarquías: clasificación, estratos, regulación (o control) y emergencia. En los siguientes apartados profundizaremos más en su significado e implicaciones.

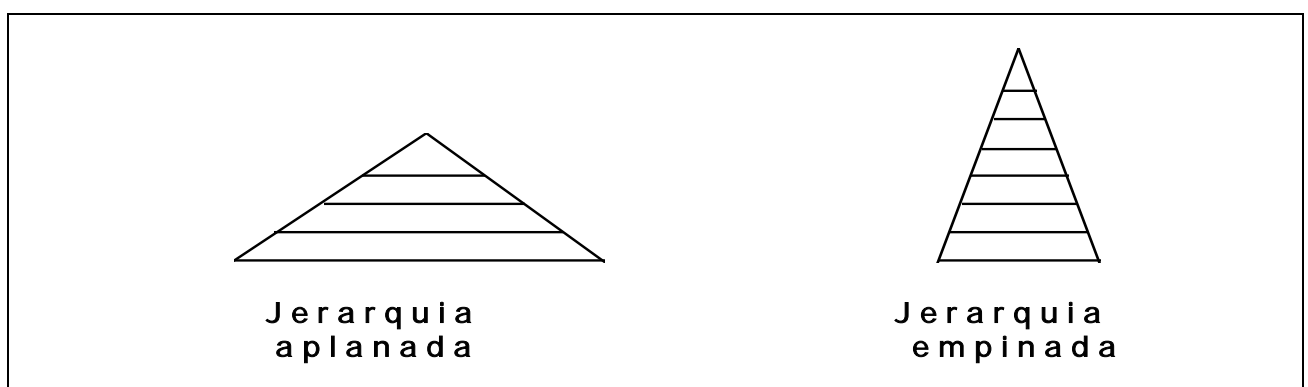
### 3. La primera definición.

Simon [Simon, 1962] estudia la jerarquía y sus relaciones con la complejidad. A él se debe la primera definición de jerarquía que vamos a presentar:

"Un sistema jerárquico es el que está formado por **subsistemas interrelacionados**, donde estos subsistemas son de tal forma que a su vez tienen una estructura jerárquica".

Como puede observarse, es ésta una definición recurrente. Se aplica comenzando por el sistema más global, y se va descendiendo con ella por sistemas cada vez más sencillos hasta llegar a lo que podríamos llamar subsistemas elementales. La estructura jerárquica así descrita lleva implícito el concepto de nivel, que estará constituido por todos los subsistemas interrelacionados que son componentes de uno dado (que estaría en el nivel inmediatamente superior). Sin embargo, es importante resaltar que no incluye la idea de subordinación, algo que suele ir acompañando a la idea de jerarquía en su acepción más usual. Así tienen estructura jerárquica tanto un ejército como una célula.

A partir de su definición, Simon introduce el concepto de **apertura** que, para un sistema dado, es el número de subsistemas que lo forman. Apoyándose en él diferencia dos tipos de jerarquías:



*Fig. 2. Representación de una estructura jerárquica aplanada y otra, empinada (Simon).*

- Aplanadas:** serán aquellas en las que la relación entre el número de niveles y la apertura sea pequeña (algo como  $1:10^{10}$ , en un volumen de gas molecular o en un diamante, por ejemplo). Podrían representarse mediante una pirámide de poca altura y gran base.

- b. **Empinadas:** La relación puede ser ahora mucho mayor (algo como 1:10). Y la pirámide con la que pueden relacionarse tendrá una base pequeña, pero mucha altura.

#### 4. Las jerarquías estructurales en la ciencia.

Whyte, en su artículo [Whyte, 1969], propone un concepto que, si bien más restringido que el de Simon, incluye algunos aspectos interesantes.

Supongamos que las entidades de que se ocupa la ciencia se encuentran dispuestas formando secuencias ordenadas de niveles (en el sentido de que podemos hablar de "nivel superior" o de "nivel inferior") distintos y separadamente filiales. Diremos que estos elementos forman **jerarquías estructurales**.

Parece ser que en este tipo de estructuras la existencia de una "unidad" en un nivel dado impone ciertas restricciones sobre los grados de libertad de las partes que la forman (que son elementos del nivel inmediatamente inferior al considerado). Para resaltar este hecho se introduce la idea de **unidad estructural**, que será la unidad que impone ciertas restricciones características sobre el margen de libertad de las partes que la forman. Se da el caso, además, de que las propiedades de la unidad no se explican cómo una simple adición de las propiedades de las partes, sino que más bien parecen emerger por encima de éstas. Esta **emergencia** puede producirse o bien por superación de un cierto umbral global en alguna propiedad, al sumarse las de las partes (síntesis de una nueva forma, efecto de aglomeración,...), o bien por superarse umbrales locales en una unidad (fragmentación).

Por ejemplo, una célula, considerada como un sistema compuesto por distintos tipos de moléculas, sería una unidad estructural. Las partes que la forman serán las moléculas que entran a formar parte de su composición. En este caso parece claro que el hecho de pertenecer a la célula impone algunas restricciones sobre los grados de libertad de dichas moléculas. Ahora no podrán interactuar de cualquier manera, porque las condiciones energéticas y ambientales están controladas de forma que la célula mantenga su vida. Por otra parte, es sencillo encontrar propiedades emergentes en el sistema total que no aparecen en las partes. Esto se refleja incluso en la ciencia que se ocupa de cada nivel: al pasar de moléculas a células pasamos de hablar en términos químicos a hacerlo en términos biológicos.

En el caso de la célula se dan las dos formas de emergencia de nuevas propiedades antes mencionadas. Por un lado podemos citar como caso de aglomeración la acumulación de algunos tipos de moléculas en la periferia, formando la membrana, de gran importancia para mantener el adecuado equilibrio en las relaciones con el medio ambiente. Y como ejemplo de emergencia de propiedades por fragmentación tenemos las distintas concentraciones locales de moléculas en el citoplasma de la célula, que llevan a la aparición de los diferentes orgánulos celulares: mitocondrias, ribosomas, vacuolas,...

Como ya habíamos adelantado, el concepto de jerarquía que hemos perfilado aquí es más restringido: el paso de un nivel a otro debe ahora implicar cierta "limitación de libertad" del nivel inferior. Se introduce así la idea de **control** de unos estratos sobre otros. Y se da la **emergencia** de

propiedades nuevas al pasar de un nivel a otro superior como característica fundamental de las estructuras jerárquicas.

## 5. Tres nociones distintas, pero relacionadas.

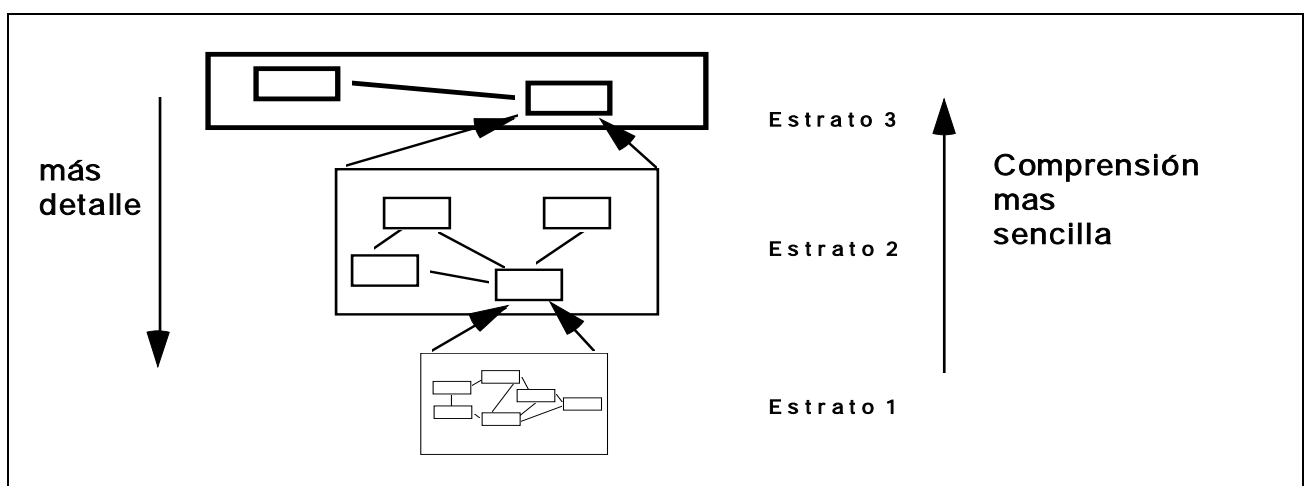
Al hablar de jerarquías, van apareciendo varias ideas que, si bien son parecidas, no son exactamente iguales. Para clarificar el tema, Mesarovic y Macko [Mesarovic y Macko, 1969] proponen una diferenciación entre tres conceptos:

1. **Jerarquía de estratos.**
2. **Jerarquía multicapa de toma de decisiones.**
3. **Jerarquía de organización.**

### 5.1. Jerarquía de estratos.

Cuando nos enfrentamos a un sistema verdaderamente complejo, nos es prácticamente imposible "encerrarlo" en una descripción que sea a la vez detallada y fácilmente comprensible. Normalmente nos encontramos con el dilema de decidir entre sencillez y detalle. La sencillez es necesaria para que la descripción sea de alguna utilidad (si es demasiado complicada, simplemente no entenderemos nada). El detalle, por su parte, es preciso si queremos tener en cuenta todos los aspectos del sistema de la forma más realista posible.

Pues bien, desde hace mucho tiempo se utiliza, de una forma más o menos consciente, una técnica que nos permite soslayar este problema. Podemos realizar una descripción por **estratos** del sistema o, dicho de otra forma, una descripción jerárquica. Para ello utilizaremos una familia de modelos, cada uno de los cuales se ocupará del sistema desde un nivel de abstracción distinto. De esta forma, tendremos las variables, relaciones, principios, etc., de cada estrato de nuestra descripción con el detalle que consideremos oportuno.



*Fig. 3. Esquema de un sistema estratificado.*

Pero no basta con esto para que nuestra descripción cumpla además el objetivo de la sencillez. Necesitaremos también que cada uno de los niveles de la descripción pueda considerarse independiente de los otros, en el sentido de que fije sus propias relaciones y características sin necesidad de hacer referencia expresa a otros niveles. A un sistema descrito de esta manera lo llamaremos **sistema estratificado**.

En una descripción de este tipo, podemos situarnos en un nivel dado, y "explorarlo", con relativa independencia de los demás. Esto nos permite llegar a conclusiones, y a un grado de comprensión que no podríamos alcanzar si intentásemos abarcar el sistema de una forma global.

Veamos algunos ejemplos para aclarar lo dicho hasta aquí. Para empezar, buscaremos en las ciencias naturales. Así nos encontramos con la estratificación del estudio de los seres vivos. Los niveles utilizados en este caso son: molecular, celular, de órganos y de organismos. Desde luego, en la realidad estos niveles no están totalmente desligados unos de otros. Pero el suponerlo a la hora de analizarlos nos permite una mayor comodidad y facilidad de profundización en cada uno de los estratos considerado por separado. En cualquier caso, no debemos perder de vista que las interrelaciones entre niveles están ahí. Si no las tenemos en cuenta sólo conseguiremos una percepción incompleta del comportamiento de sistema global. De hecho, al centrarnos en un enfoque puramente biológico de los seres vivos ya nos estamos aislando de otros puntos de vista igualmente posibles (a otros niveles de abstracción), como podrían ser el físico-químico o el ecológico, sin los cuales no podremos explicar determinadas características del sistema (en nuestro caso, los seres vivos).

Otro ejemplo en el que estamos acostumbrados a un estudio jerárquico es el del ordenador. Es normal pensar en él como, al menos, el conjunto formado por dos niveles: el puramente electrónico y el informático. En el nivel electrónico tenemos todos los circuitos que componen el ordenador, y las relaciones entre ellos. Las variables a este nivel serán intensidades de corriente eléctrica, tensiones, etc. Los elementos básicos son los transistores, resistencias, condensadores... En el nivel informático, sin embargo, el ordenador puede ser considerado como un procesador de información. Hablaremos ahora de flujos de datos y de operaciones lógicas, de cantidades de información, etc. En cada uno de los dos niveles ignoramos casi totalmente la existencia del otro, lo que nos permite comprender el sistema de una forma mucho más sencilla, aunque incompleta. Como pequeño ejercicio puede imaginarse, por un momento, lo que supondría seguir el proceso de ejecución de un programa atendiendo únicamente a las intensidades de corriente que pasan por los transistores de la CPU. Por otra parte, los dos niveles de los que hemos hablado pueden a su vez ser subdivididos en otros muchos (habitualmente lo son). Así, para el informático, se definen las "máquinas virtuales" a distintos niveles de abstracción: la que nos proporciona el lenguaje máquina, los de alto nivel, o alguna interfaz de usuario.

De los ejemplos dados (y de alguno más que pueda descubrir el propio lector), pueden extraerse algunas características generales de la descripción estratificada de sistemas:

- a. El **observador** es quien elige los estratos que describen el sistema, según sus conocimientos, sus intereses, etc. Un observador interesado sólo en la electrónica, podrá teóricamente dar una descripción completa desde el punto de vista físico de un ordenador, con todos sus circuitos detallados. Pero si no tiene noción de ello, no puede describirlo



como procesador de información: para ello tendría que pasar a otro nivel, del nivel físico al informático.

- b. En general, los niveles son bastante independientes, en el sentido de que las leyes que gobiernan el comportamiento del sistema en un estrato dado no pueden deducirse de los principios empleados en otros. Por ejemplo, a partir de las leyes de la física no pueden deducirse las de la informática. Podemos hablar de **independencia de comprensión**.
- c. Hay una interdependencia asimétrica entre los distintos estratos (**interdependencia funcional**). Con esto nos referimos a que para el correcto funcionamiento de un nivel es preciso que todos los que se encuentran por debajo de él también funcionen adecuadamente. Así, los requisitos que deben verificarse en un estrato para que cumpla adecuadamente su funcionalidad suelen encontrarse en los estratos inferiores como constricciones impuestas a sus comportamientos. Veamos un ejemplo: Para que un ordenador funcione adecuadamente, es necesario que los componentes electrónicos de que está formado operen dentro de unas ciertas condiciones (así, los transistores sólo estarán en cortocircuito o en saturación, para darnos los dos niveles digitales).
- d. Cada estrato tiene su propio lenguaje, sus propios conceptos y principios. Y en cada estrato el sistema y sus objetos son definidos de una forma distinta. Normalmente, a medida que subimos en la jerarquía de estratos para un sistema cualquiera, vamos perdiendo detalle en la descripción. Es como si al ir alejándonos del sistema fuésemos percibiéndolo más desdibujado, y sin los detalles que podíamos apreciar cuando estábamos más cerca. De esta forma, lo que en un estrato es considerado un sistema, en el inferior se descompone en un conjunto de subsistemas. En el caso del ordenador, en el nivel electrónico tenemos transistores, resistencias, condensadores... Pero subiendo un nivel, nos los encontramos agrupados en circuitos (memorias, sumadores, amplificadores). Y aún más arriba, en equipos (ordenadores). En los estratos inferiores nos dedicamos al estudio por separado de los subsistemas, mientras que en los superiores atendemos especialmente a las relaciones entre éstos (ver el capítulo "Tratamiento de la complejidad").
- e. Cuando descendemos en la jerarquía de estratos, obtenemos más detalle, pero cuando ascendemos, profundizamos más en la comprensión del sistema. Así, el biólogo se basa en la duplicación de las cadenas de ADN para explicar los fenómenos de la herencia. El bioquímico se basa en las propiedades de los nucleótidos para explicar ésta duplicación. El químico explica la formación de parejas de nucleótidos basándose en la formación de enlaces de hidrógeno. A su vez, el físico molecular explica éstos utilizando funciones del potencial intermolecular, que el físico cuántico se encarga de estudiar a partir de la ecuación de ondas...

## 5.2. Jerarquía multicapa de toma de decisiones.

Otro concepto asociado con las jerarquías aparece cuando estudiamos los procesos de toma de decisiones. El dilema viene dado ahora por la necesidad de tomar la decisión cuanto antes (limitación temporal de actuación), pero tomándonos el tiempo suficiente para poder comprender la situación y decidir de una forma acertada. Para poder conjugar adecuadamente estas dos aspiraciones es frecuente una aproximación jerárquica: dividimos la decisión en una secuencia de problemas decisorios más sencillos (capas decisorias), y los vamos resolviendo uno a uno. Cada vez que resolvemos uno de estos "subproblemas", fijamos una serie de condiciones sobre el siguiente, que harán más fácil su resolución, y así sucesivamente.

Tenemos así lo que podemos denominar **jerarquía de capas decisorias**, construida de tal forma que la resolución de todas las capas implica la resolución del problema original. El sistema de toma de decisiones que funciona de esta forma se llama **sistema de capas múltiples de decisión**.

Veamos un ejemplo de la vida cotidiana que nos puede ilustrar estos conceptos. Podríamos pensar que la meta de una persona dada es ser feliz. Pero, así especificada, es ésta una meta muy poco definida: con gran probabilidad la concretará, según sus creencias, en estudiar una cierta carrera, buscar un tipo de trabajo, o elegir una determinada forma de vida. Una vez elegido este objetivo concreto, vendrá la toma de decisiones "encadenadas". Si nuestro personaje elige ir a la universidad, tendrá que comenzar por decidir la carrera en la que se matricula. Luego, la especialidad que cursará, si seguirá hasta doctorarse o no, etc. Y normalmente sólo una vez que hemos alcanzado una de estas submetas (por ejemplo, acabar la especialización), podremos evaluar si nos estamos acercando o no a la meta de ser feliz, y basándonos en esa evaluación tomaremos la siguiente decisión. Además, cada decisión que ponemos en práctica restringe el número de posibilidades que tenemos al tomar la siguiente (si elegimos la carrera de medicina, a la hora de buscar trabajo no tendremos que preocuparnos por la posibilidad de ejercer como abogado). De esta forma la toma de decisiones se ve facilitada, ya que nuestra mente sólo puede tener en cuenta un número relativamente pequeño de opciones.

## 5.3. Jerarquía de organización.

Este concepto aparece en sistemas compuestos por un conjunto de subsistemas interaccionantes, alguno de los cuales son unidades de toma de decisiones. Dichas unidades han de estar organizadas de forma que haya una jerarquía establecida sobre ellas. Esto es, es preciso que unas manden sobre otras (en el sentido de que influyan en sus decisiones). Llamaremos a estos sistemas **de metas y niveles múltiples**, por la gran importancia que tiene en ellos el que las unidades de decisión tengan metas en conflicto. Esta multiplicidad de metas será necesaria para que el sistema, en su totalidad, funcione de forma adecuada.

En las organizaciones humanas tenemos un destacado ejemplo de estas jerarquías. En ellas cada individuo representa un centro de decisión, condicionado por las estructuras de mando que actúan sobre él. En principio, tiene sus propios objetivos, aunque inevitablemente la jerarquía que impone la organización influye fuertemente en las decisiones que puede tomar.

Los siguientes factores parecen explicar el gran éxito de esta forma de organización:

- a. Dado un conjunto de subsistemas independientes pero interactuantes, permite integrarlos en un sistema global de una forma bastante natural.
- b. Permite abordar tareas que sobrepasan, muchas veces con creces, la capacidad (física, pero también de toma de decisiones) de las unidades.
- c. Los recursos disponibles pueden ser utilizados de una forma muy eficiente.
- d. Las perturbaciones locales se propagan con gran dificultad a otras partes del sistema. Esto proporciona una gran fiabilidad. Pero también puede llevar a importantes inercias.

Una de las principales características de los sistemas de metas y niveles múltiples es que, aunque las unidades de rango jerárquico inferior pueden estar muy condicionadas por las de rango superior, siempre se mueven dentro de un margen de libertad en lo que se refiere a su toma de decisiones. Puede mostrarse que esa "libertad limitada" es esencial para el funcionamiento eficiente de estas estructuras. Y esto cuenta no solo para los sistemas "naturales" (sociales, biológicos,...) sino también para los contruidos por el hombre.

## 6. Una formalización matemática.

Bunge [Bunge, 1969] propone una formalización matemática del concepto de jerarquía que engloba bastante bien todas las aportaciones estudiadas.

De una forma estricta, puede entenderse el concepto de jerarquía como una relación de subordinación (y dominación) que afecta a un conjunto. Basándonos en esta idea, pasamos a la siguiente definición formal:

"Sean  $C$  un conjunto no vacío,  $i$  un elemento de  $C$ , y  $D$  una relación binaria en  $C$ . Decimos que la terna ordenada  $J = \langle C, i, D \rangle$  es una **jerarquía** si, y sólo si, se cumple que:

- a.  $i$  es el elemento iniciador de  $C$ .
- b.  $i$  se encuentre siempre "por encima" de cualquier otro elemento de  $C$ , en el sentido marcado por la relación  $D$ .
- c. Para cualquier elemento  $y$  de  $C$  (excepto  $i$ ), hay un único elemento  $x$  de  $C$  tal que  $Dxy$  (esto es,  $x$  "domina" a  $y$ ).
- d. La relación  $D$  es antisimétrica y transitiva.
- e. La relación  $D$  representa dominación o poder."

$D$  es por tanto una relación de dominio. Desde este punto de vista, podemos interpretar que a. y b. fijan al elemento  $i$  como "jefe supremo" de la estructura. La condición c. supone que cada elemento tenga un jefe y sólo uno. El flujo de poder, y el sentido de éste de "arriba abajo" viene dado por d.

De esta definición puede deducirse de forma natural el concepto de rango:

"Decimos que un subconjunto  $C_n$  de  $C$ , que no sea  $i$ , es el  $n$ -ésimo rango de  $J$  si, y sólo si, para todo  $x$  de  $C_n$ ,  $x$  se encuentra  $n$  escalones "por debajo" de  $i$  (según la relación  $D$ ). Se entiende escalón como una única aplicación de la relación  $D$ "

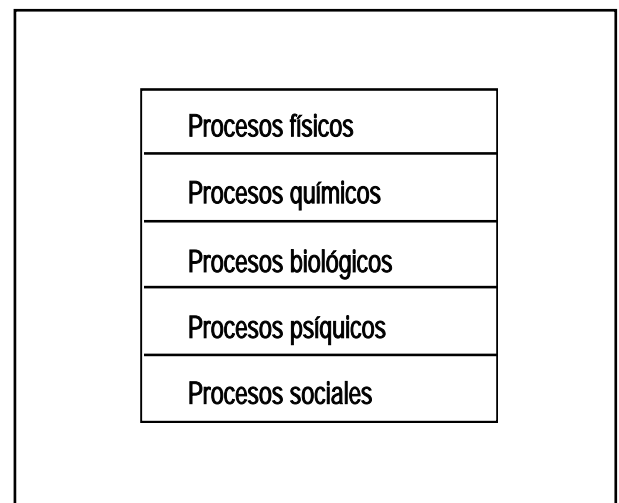
Así pues, podemos representar la jerarquía que hemos definido como un árbol finito. No podrá contener lazos cerrados, y se ramificará a partir de un solo punto (que será el que se corresponda con el elemento  $i$ ). Tenemos, por tanto, lo que en teoría de grafos se llama **grafo orientado abierto**. Sin embargo es importante hacer notar que la condición  $e$ . de las que antes impusimos es puramente semántica, de significado de la relación, y por tanto no representable mediante el grafo.

Una vez definido lo que entendemos por jerarquía, pasemos a ver qué es lo que consideramos estructura de niveles:

"Sea un par ordenado  $N=\langle C,E \rangle$ , donde  $C$  es una familia de conjuntos de sistemas individuales, y  $E$  una relación binaria en  $C$ . Decimos que  $N$  es una **estructura de niveles** si, y sólo si:

- Todo conjunto miembro de  $C$  es una clase de equivalencia de sistemas (esto es, los sistemas de ese conjunto comparten ciertas propiedades y principios).
- $E$  es una relación multívoca, reflexiva y transitiva en la familia de conjuntos  $C$ .
- La relación  $E$  refleja la emergencia de ciertas propiedades, esto es, la aparición de sistemas que son cualitativamente distintos de los que los forman."

A partir de esta definición, llamaremos **nivel** a cada uno de los conjuntos de sistemas de  $N$ . Como podemos ver, ésta es una formalización que se corresponde muy bien con la idea intuitiva de nivel jerárquico. La condición  $a$ . nos asegura que el nivel que estamos definiendo tenga un contenido semántico, entendido como una semejanza entre sus componentes. Es importante el concepto de emergencia, que es el verdadero núcleo de la definición. Para que aparezca un nivel superior no es suficiente que haya agregación, sino que es preciso que además aparezcan ciertas pro-

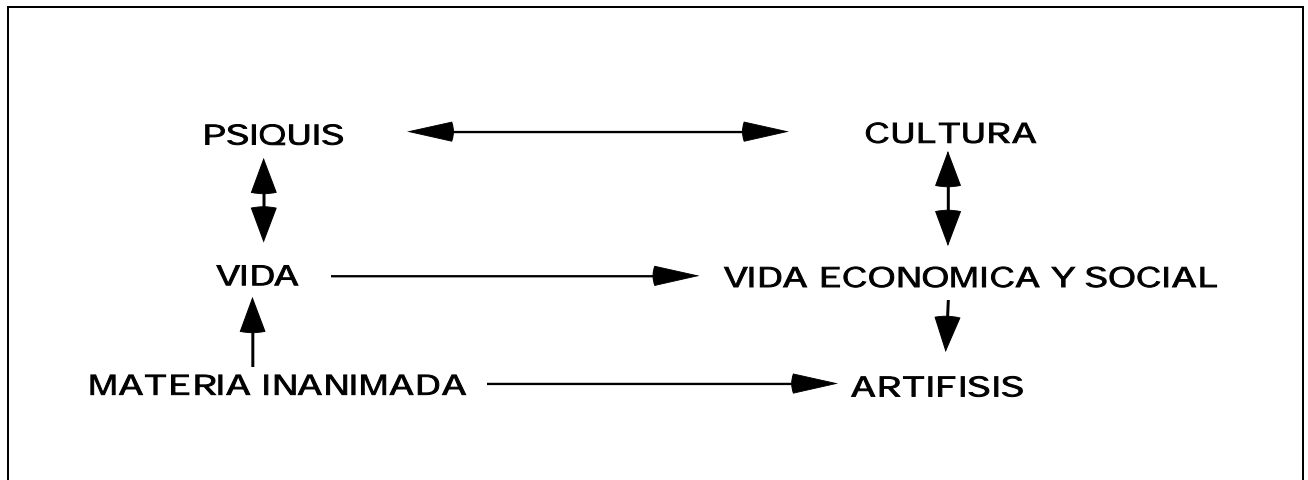


*Fig. 4. Ejemplo de estructura de niveles sin relación de dominio.*

iedades nuevas, no explicables (al menos de una forma sencilla y directa) en función de las propiedades de los sistemas componentes.

El concepto que hemos definido como estructura de niveles es independiente del de jerarquía. En concreto, no encontramos en la definición de estructura de niveles las ideas de dominación ni de orden (la relación de emergencia  $E$  no es asimétrica). Así, aunque pueda haber estructuras de niveles que sean jerárquicas, también puede haberlas que no lo sean.

Un ejemplo de estructura de niveles sin relación de dominación podría ser la de los procesos en la naturaleza (ver figura 4).



*Fig. 5. Ejemplo de estructura de niveles no ordenada (fusión de dos estructuras de niveles: la de la naturaleza y la de la sociedad), tomado de [Bunge, 1969], pág. 38.*

Y como estructura de niveles que ni siquiera está ordenada, podemos considerar la que propone Bunge para la naturaleza y la sociedad [Bunge, 1960] (ver figura 5). Sin pararnos en su significado, quedémonos sólo con su estructura, y veamos que se corresponde a la definición de estructura de niveles. C sería el conjunto formado por los seis niveles (psiquis, cultura, vida, vida económica y social, materia inanimada y artífisis), y E la relación dada por las flechas. A partir de aquí es fácil comprobar que se cumplen para este conjunto C y esta relación E las tres propiedades de la definición.

Invitamos al lector a reflexionar sobre la descomposición estructurada, representada incluso gráficamente, que del tema **Complejidad y Tecnologías de la Información** estamos haciendo en estas **Notas**:

**Complejidad y Tecnologías de la Información:** G; M; T.I..

**G:** Enfoques y Teorías; Sistemas; Tratamiento.

**Enfoques y Teorías:** Variedad; Conceptos; Marcos.

**Etc.**

## 7. Principios de la realidad jerárquica.

A modo de conclusiones, exponemos a continuación los principios que propone Wells sobre la forma en que la jerarquía se manifiesta en el mundo real [Wells, 1969].

- a. La realidad está estructurada de forma jerárquica. El primer nivel de esta estructura estará compuesto por las partículas elementales. Luego vienen los de átomos y moléculas. Con esto se acaban los estratos inorgánicos. Pero continuamos con los que forman las células y los seres vivos multicelulares. Y aún podemos seguir con el estrato que componen los sistemas sociales.

- b. Los elementos de un nivel dado no pueden estar formados por un número cualquiera de entidades del nivel inferior, sino que existe una limitación en ese número. Así, las moléculas por lo general están compuestas por un número limitado de átomos (lo que las mantiene en un tamaño microscópico). Los propios átomos parecen presentar un límite en el número de electrones que contienen (que está en torno a 100). Esto también es válido para las estructuras sociales: los militares, por ejemplo, aplican los valores que consideran óptimos en el tamaño de los pelotones, de las compañías, etc. Esta idea podría expresarse en función de la apertura definida por Simon: "La apertura que pueden alcanzar los sistemas reales es limitada".
- c. En cualquier sistema jerárquico existen relaciones de complementariedad. Estas son notables en los enlaces químicos, que se basan en la unión de átomos complementarios en cuanto a su "apetencia" de electrones. Las organizaciones sociales pueden alcanzar objetivos imposibles de lograr aisladamente por las personas que las componen gracias a la diferenciación y complementariedad de las funciones que desempeñan estas personas.
- d. En un sistema integrado, todas las partes son necesarias. No podemos prescindir de ningún subsistema sin que el funcionamiento total se resienta, o incluso desaparezca. Aquí estriba una de las diferencias entre simple agregación de elementos y formación de un sistema. En el primer caso no hay orden, ni propiedades emergentes, mientras que en el segundo aparecen propiedades nuevas, que de alguna manera dan entidad diferenciable al todo.
- e. Las entidades libres son las que dan dinamismo al universo. Llamamos aquí entidades libres a las que tienen mayor complejidad dentro de su nivel, y no están incluidas en ninguna entidad de nivel superior. Tenemos así átomos libres (cuando no forman moléculas), moléculas libres, células libres... Al no estar "encajadas" en un lugar fijo dentro de un sistema, están listas para una integración, con lo que se posibilita la aparición de nuevos tipos de sistemas.

## 8. Importancia del concepto de jerarquía.

Como ya hemos ido viendo por los ejemplos expuestos, las estructuras jerárquicas son muy abundantes en el mundo real. ¿Qué es lo que hace que este tipo de organización se halle tan extendida? En este apartado vamos a intentar explicarlo en función de su utilidad en tres grandes áreas:

1. Construcción de complejidad.
2. Comprensión de complejidad.
3. Procesamiento de información.

### 8.1. Construcción de complejidad.

Para construir un sistema de una forma jerárquica podemos seguir el siguiente proceso:

- a. Partimos de elementos simples.
- b. Ensamblamos estos elementos, para formar un sistema de mayor complejidad.
- c. Considerando los sistemas obtenidos en el apartado b., los consideramos ahora como elementos básicos y pasamos de nuevo al punto a., hasta que consigamos un sistema de la complejidad deseada.

Para comprobar las ventajas que supone el proceso descrito bastará con recurrir a un ejemplo propuesto por Simon [Simon, 1962]. Tempus y Hora son dos relojeros. Pero mientras que Tempus ensambla los relojes montando los elementos de uno en uno, Hora lo hace por módulos, de forma jerárquica. Cada vez que uno de los relojeros recibe a un cliente, ha de atenderle, con lo que pierde todo el trabajo que estaba realizando en ese momento. La diferencia está en que mientras Hora como mucho puede perder, por cada llamada de un cliente, el tiempo empleado en montar un módulo, Hora debe rehacer el reloj completo.

De este ejemplo se deduce fácilmente la razón por la cual la estructura jerárquica permite trabajar del modo propuesto, mientras otras formas de organización, no. Y es que en el caso jerárquico hay formas intermedias (los módulos de Hora) que son estables y "cerradas". Y estas formas permiten continuar el proceso de ensamblado ocultando gran parte de su complejidad.

### 8.2. Comprensión de la complejidad.

Ya hemos visto que la estructura jerárquica nos permite abordar el problema de representar los sistemas complejos con detalle y sencillez a la vez. Con detalle, porque cada nivel (o cada "módulo" parte de un nivel, puede ser descrito con tanto detalle como queramos. Y de una forma relativamente sencilla de comprender porque nos podemos centrar por un lado en comprender la estructura jerárquica del sistema, y por otro la de cada uno de los "módulos" que lo componen. Y la complejidad de estas tareas es mucho menor que la que implica la comprensión del sistema de una forma directa.

Un sistema es descomponible cuando sus partes pueden aislarse unas de otras. Y cuasidescomponible cuando los subsistemas que lo componen pueden considerarse casi aislados, por ser las relaciones entre ellos mucho más débiles que las que se dan en su interior. Simon menciona estas propiedades de descomponibilidad o cuasidescomponibilidad de los sistemas jerárquicos como las que facilitan la comprensión [Simon, 1962]. El concepto de cuasidescomponibilidad es muy útil como principio de diseño de sistemas, como se ha demostrado en [Sáez-Vacas et al., 1982].

### 8.3. Procesamiento de información.

En general, podemos decir que los excesos en la cantidad de información que un sistema debe manipular son nocivos. Desde luego, serán costosos en utilización de recursos, y requerirán un esfuerzo extra. Pues bien, la organización jerárquica también es eficiente desde este punto de vista. Es muy económica en el flujo de información necesario para la coordinación y funcionamiento [Milsum, 1978]. De esta forma reduce el coste y la posibilidad de que se produzcan sobrecargas.

Otro aspecto destacable es que la estructura jerárquica permite que gran parte de la información se procese de forma distribuida por todo el sistema. Ciertas partes pueden especializarse en algunas tareas, liberando así al resto de realizarlas. Además, al trabajar de esta forma, pueden actuar como filtros de información, permitiendo que sólo pase al sistema la estrictamente necesaria.

## 9. Resumen.

Hay diferentes formas de entender la idea de jerarquía, pero todas incluyen el concepto de **clasificación en estratos**, según algún **rango** (característica de los objetos clasificados).

Los sistemas jerárquicos pueden definirse recursivamente como un conjunto de subsistemas **jerárquicos interrelacionados**.

En las jerarquías estructurales, tal como las entiende Simon, es importante la idea de **emergencia** de nuevas propiedades y comportamientos al pasar de un nivel a otro superior.

El concepto de jerarquía se aplica al menos en tres formas relacionadas: en la descripción de la realidad (**jerarquía de estratos**), en la toma de decisiones (**jerarquía multicapa de toma de decisiones**) y en la organización (**jerarquía de organización**).

Dada la formulación matemática del concepto de jerarquía, puede definirse el concepto de **estructura de niveles**, más amplio, y que engloba al anterior.

La importancia de las estructuras jerárquicas viene dada, entre otras ventajas que aportan, por su facilidad para **construir complejidad**, para **comprenderla**, y para **procesar información**.

El concepto de jerarquía, desde el punto de vista del análisis de la variedad, podría entenderse en cierto modo como un **filtro de variedad** (ver "Adaptación = Amplificación + Reducción", en el capítulo "La variedad"). Por una parte está una parte del mundo real, de una gran variedad. Por otra, un observador, con sus limitadas capacidades. Pues bien, el usar una aproximación jerárquica le permite tratar con aspectos de variedad manejable. Por una parte, mientras está estudiando un determinado nivel, sólo se enfrenta con su variedad (en general mucho menor que la asociada al objeto entero). Y por otra, cuando busca una visión de conjunto, sólo tiene que contemplar el nivel más alto, lo que de nuevo le permite tratar con algo de relativamente poca variedad.



## Bibliografía.

Dividida en dos apartados. En el apartado de Notas Bibliográficas se comentan aquellos trabajos que más profusamente han servido para redactar las páginas anteriores. El apartado de Referencias Bibliográficas contiene todos los trabajos citados.

### Notas bibliográficas.

Un libro muy adecuado para una toma de contacto con el concepto de jerarquía es "**Las estructuras jerárquicas**", constituido por las actas del simposio celebrado en noviembre de 1968 en los Douglas Advanced Research Laboratories. Comienza con un repaso general y teórico de las jerarquías, para detenerse luego en campos más concretos y prácticos (las jerarquías orgánicas, las inorgánicas, y las de las artificiales). Para un lector novato en estos temas, será de especial interés la primera parte (repaso general), y especialmente los artículos de Whyte [Whyte, 1969] (donde se hace una revisión histórica de la evolución del estudio de las jerarquías), Bunge [Bunge, 1969] (donde se desarrolla una formalización matemática de conceptos relacionados con la jerarquía), y Mesarovic y Macko [Mesarovic y Macko, 1969] (de donde hemos tomado la distinción entre jerarquía de descripción, de toma de decisiones y de organización).

### Referencias Bibliográficas.

- Bunge, M. (1960): "On the connections among levels", **Proceedings of the XIIth International Congress of Philosophy**, vol. 6, Sansoni, Florencia.
- Bunge, M. (1969): "La metafísica, epistemología y metodología de los niveles", publicado en Whyte, L.: "**Hierarchical structures**", American Elsevier [en español (1973): "Las estructuras jerárquicas", Alianza, Madrid].
- Grene, M. (1969): "La jerarquía: una palabra, pero ¿cuántos conceptos?", publicado en Whyte, L.: "**Hierarchical structures**", American Elsevier [en español (1973): "Las estructuras jerárquicas", Alianza, Madrid].
- Mesarovic, M.D. y Macko, D. (1969): "Fundamentos de una teoría científica de los sistemas jerárquicos", publicado en Whyte, L.: "**Hierarchical structures**", American Elsevier [en español (1973): "Las estructuras jerárquicas", Alianza, Madrid].
- Milsum, J.H. (1978): "**La base jerárquica para los sistemas generales vivientes**", publicado en Klir, G.J.: "Tendencias en la teoría general de sistemas", Alianza Editorial, Madrid.
- Sáez-Vacas, F. y Lampaya D. (1982): "Concepción multinivélica y cuasidescomponible de sistemas complejos. Aplicación a la informática". **Actas V Congreso de Informática y Automática**, pp. 281-286.
- Shapley, H. (1958): "**Of stars and men**", Beacon Press, Boston [en español (1963): "De estrellas y hombres", F.C.E., México.]

- Simon, H. (1962): "**The architecture of complexity**", Proceedings American Philosophical Society, núm.106, pp.467-482 [en español (1979): "La arquitectura de la complejidad" publicado en Simon, H.: "Las ciencias de lo artificial", pp.128-169, A.T.E., Barcelona].
- Wells, B. (1969): "Los niveles y las entidades integradas", publicado en Whyte, L.: "**Hierarchical structures**", American Elsevier [en español (1973): "Las estructuras jerárquicas", Alianza, Madrid].
- Whyte, L.L. (1969): "Las jerarquías estructurales, o una retadora clase de problemas físicos y biológicos", publicado en Whyte, L.: "**Hierarchical structures**", American Elsevier [en español (1973): "Las estructuras jerárquicas", Alianza, Madrid].