

Dinámica de sistemas aplicada en la epidemiología

José Alfonso Delgado (Coronel Médico)

24 de octubre de 2018

CONTENIDO

1. Introducción al tema.....	2
2. Pensamiento sistémico	2
3. Planteamiento del problema	5
4. Modelos DS epidémicos básicos.....	5
#1.- Modelo de Reed y Frost.....	6
#2.- Modelo de Kermack y Mc Kendrick.....	7
5. Modelos DS de epidemias	8
6. Aplicación de DS al diseño de la Unidad de Alto Aislamiento	12
7. Material y método	12
8. Resultados	14
#1.- Conjunto básico de variables.....	14
#2.- Diagrama causal	15
#3.- Explicación textual.....	15
#4.- Modelo dinámico (Diagrama de Forrester)	17
#5.- Sistema de ecuaciones	17
#6.- Resultados de las simulaciones	23
9. Discusión.....	27
10. BIBLIOGRAFÍA	28

1. Introducción al tema

Permítanme, antes de hablar del tema motivo de esta ponencia, que les introduzca brevemente en cómo un médico militar, o simplemente un médico puede llegar a cruzarse en su camino intelectual, una técnica tan alejada de su base de conocimientos profesionales como es la técnica de simulación matemática denominada la Dinámica de Sistemas.

En 1977, siendo yo estudiante de quinto de medicina, escuché o mejor, tomé conciencia por primera vez del término "feed back" al estudiar la asignatura de Endocrinología. El término me llamó la atención y coincidió que mirando libros en una céntrica librería me di de bruces con el libro de Javier Aracil "Introducción a la Dinámica de Sistemas". Me intrigó su título. Lo compré y se me abrió de repente un ilimitado mundo de la Teoría General de Sistemas y una de las técnicas que se pueden aplicar, la Dinámica de Sistemas.

Lo que realmente tuvo impacto en mí, como médico, no fue la Dinámica de Sistemas, sino el pensamiento sistémico planteado por L. Von Bertalanffy (a la sazón Biólogo austriaco) (Bertalanffy 1, 2, 3 y 4). Aprender a pensar de modo holístico, global, en permanentes escenarios feed back fue lo que me subyugó definitivamente y me lanzó a la increíble aventura de cultivar los métodos de análisis basados en la Teoría General de Sistemas y, concretamente, para el diseño y simulación de modelos, con la técnica de la Dinámica de Sistemas. Que Bertalanffy fuera Biólogo no era una coincidencia; era lo suyo, porque sólo desde una ciencia como la Biología, los conceptos sistémicos adquieren verdadero sentido, porque la vida es un extremadamente complejo escenario de sistemas vivos relacionados entre sí, que contribuyen al desarrollo y evolución de la Naturaleza. Cualquier profesional de la Biología o de la Medicina, que tome conciencia de ello, caerá en las redes de esta apasionante disciplina científica, la Teoría de Sistemas.

Toda mi producción científica, tesis doctoral, trabajos publicados o simplemente elaborados a efectos internos de mi trabajo como médico militar, de alguna forma está relacionada con el enfoque sistémico de los problemas o con el desarrollo de planteamientos basados en Dinámica de Sistemas.

El problema radica en el hecho de que si un advenedizo se introduce en un terreno tan ectópico como este para el entorno médico lo más probable es que carezca de interlocutores con quien compartir experiencias. Y si desarrollas un informe basado en la técnica DS, para aconsejar al jefe a que tome una decisión, sucede como en Estadística; no le expliques al jefe algo que sea más complicado que la media aritmética, porque no te va a entender. Así que a lo largo de mi vida profesional he utilizado permanentemente el pensamiento sistémico y la DS, pero sus entresijos me han sido extremadamente difícil compartir.

2. Pensamiento sistémico

Antes de entrar en asunto del título de la conferencia (modelos DS de epidemias), en deferencia a los que no están familiarizados con el modo sistémico de razonar, voy a hacer una brevísima (y no suficiente) introducción a lo que es el pensamiento sistémico, que no sé si valdrá para mucho, pero al menos lo voy a intentar.

(1) El pensamiento sistémico no es otra cosa que tratar de pensar y comprender la realidad como un todo interrelacionado, donde las cosas no suceden de modo aleatorio. Eso parece, pero, como diría Einstein, hemos de reconocer que tratar de comprender una realidad concreta en base a tres o cuatro variables, aunque tengan un peso específico absoluto, no consiguen abarcar la miríada de "variables ocultas" que pueden alterar los cálculos. En física, el determinismo matemático puede que valga (a escala newtoniana), pero desde luego, en biología y en Medicina, es evidente que no.

(2) El **concepto de sistema** es algo que se entiende intuitivamente, además, la definición es bastante simple: **conjunto de elementos que relacionados entre sí, contribuyen a un fin concreto**. Más allá de esta idea intuitiva, se despliega simplemente "la realidad tangible".

(3) En esa realidad tangible, suceden cosas a velocidad de vértigo, que fuera de los tubos de ensayo o de unos límites más o menos controlables, presentan una curiosa propiedad, denominada "**complejidad de detalle**", es decir que a medida que hacemos zoom y vemos los entresijos de los acontecimientos, tanto físicos, como biológicos o sociales, esas variables ocultas de Einstein aparecen como setas por todas partes, hasta hacernos intuir que eso de que cuando una mariposa bate las alas en Hong Kong, llueve en Nueva York, a lo mejor hasta es cierto.

(4) Otra curiosidad que presentan los sistemas complejos es la "**complejidad dinámica**" basada en la complejidad de interrelaciones entre elementos, de modo que el comportamiento a corto plazo apenas si tiene que ver con el comportamiento a largo plazo. Pongo por caso la evolución de la bolsa de renta variable o la evolución de la población. La demografía tiene sus leyes, pero la sociología tiene las suyas que además son temporales y pueden hacer echar por tierra las previsiones a largo plazo.

(5) No obstante, una de las propiedades de los sistemas reales es la tendencia a la **estabilidad o Steady state**. De no ser así, si no mostraran esa tendencia o cuando la pierden, el sistema entra en disfunción, de modo que si no recupera el comportamiento estable, simplemente estallará más tarde o más temprano. Y ahí es donde se colocan los "**límites del sistema**". Es decir, los sistemas reales sólo pueden presentar dos comportamientos, el que refleja estabilidad es el **comportamiento oscilante** en torno a un margen de viabilidad. Cuando se sobrepasan los límites, el sistema se vuelve inestable (enferma) y o bien se recupera o bien muere.

(6) El otro comportamiento es el **crecimiento o decrecimiento** hasta llegar a un límite asintótico donde recuperará un comportamiento estable, oscilante.

(7) Comprender todas estas propiedades requiere un enfoque mental muy concreto y con cierta sistematización. La realidad está ahí, fuera de nosotros. Percibimos detalles de ella por nuestros sentidos. Pero todas esas señales que llegan a nuestro cerebro, nuestra mente tiene que de alguna forma organizarla para que sea comprensible y entendible. Para ello, la mente utiliza un procedimiento muy interesante y eficaz. Construye lo que denominaríamos "**modelos de realidad**", es decir, elabora modelos como la "**representación formal de un sistema**". Y así, es posible comprender mediante un necesario reduccionismo, la realidad que tenemos ante nuestros ojos.

(8) Al diseñar un modelo como representación formal de un sistema, lo primero que llama la atención es que pensándolo lo bien, **no hay variables independientes**. Todos los elementos están relacionados entre sí bien mediante un comportamiento **directamente relacional**, si sube o baja el primero, sube o baja el segundo e **inversamente relacional** si al subir el primero, el segundo baja y al revés. De este modo, lo que se establecen como relaciones son **bucles, reforzadores** (crecimiento o decrecimiento continuo) y **bucles compensadores** (tendencia al estado estable).

Con estos simples conceptos, tenemos en esencia, las bases sobre las que comprender en primera instancia el comportamiento de los sistemas y con ello, la realidad global que nos rodea.

(9) Sistemas los hay de infinitud de tipos, pero desde una perspectiva biológica y social, lo más parecido a un sistema son las **organizaciones** y el **comportamiento de los agentes** de varios sistemas relacionados.

(10) Una organización humana o natural posee una **estructura** o elementos que la integran, una **función** u orden y secuencia de procesos y una **finalidad** o razón de ser. En esencia, como en el mundo físico, los sistemas se rigen por la **segunda ley de la termodinámica** (el trabajo genera desorden, que tiene que compensarse con un esfuerzo suplementario para mantener el nivel de entropía lo más bajo y controlable posible).

(11) Y todas las organizaciones poseen un **sistema de mando y control** también conocido como Sistema de Información.

(12) Con todos estos conceptos, los modelos se pueden elaborar en tres niveles de complejidad o formalismo. Hay **modelos mentales**, donde lo importante es la descripción textual con algún gráfico de apoyo sin metodología concreta. Hay **modelos gráficos**, donde lo importante es el gráfico que lo representa, con comentarios aclaratorios y por último se pueden elaborar **modelos formales**, generalmente basados en modelos matemáticos, con el que se alcanza la mayor concreción que además permite efectuar **simulaciones**.

(13) Las organizaciones (biológicas o humanas), tienden a evolucionar y a incrementar su complejidad. Las organizaciones sencillas suelen ser "**totipotenciales**", es decir, que entre todos sus elementos, con una razonable capacidad de intercambio con el entorno, son capaces de sobrevivir, dado que pueden procesar las diferentes funciones vitales para la pervivencia de la organización, En la medida en que crecen y se incrementa el número de elementos, la tendencia es a la **subagrupación en subsistemas** y a la **especialización** de funciones, con lo que cada subsistema deja de cumplir todas sus funciones vitales para centrarse en una sola para toda la organización, mientras que lo que necesita, lo recibe de los demás subsistemas. Son dependientes del Todo.

(14) Así que en la vida real, los sistemas orgánicos de por sí complejos, pueden presentar tres atributos, **estado estable**, que supone **orden** y comportamiento previsible. **Estado caótico** de comportamiento imprevisible y **estado complejo**, de comportamiento variable. En el extremo, el comportamiento puede llegar a ser **fractal**. Es la mejor presentación de lo que son los sistemas de alta complejidad.

(15) Cuando el comportamiento pierde los límites de la estabilidad y se produce el paso a un comportamiento creciente o decreciente, el sistema puede encaminarse a dos estados, el primero al de un **crecimiento o decrecimiento regulado** con el que alcanzará de modo parabólico un nuevo estado estable, superior o inferior al inicial; o bien un crecimiento o decrecimiento no regulado, con el que terminará comprometiéndose la viabilidad del propio sistema, de la propia organización.

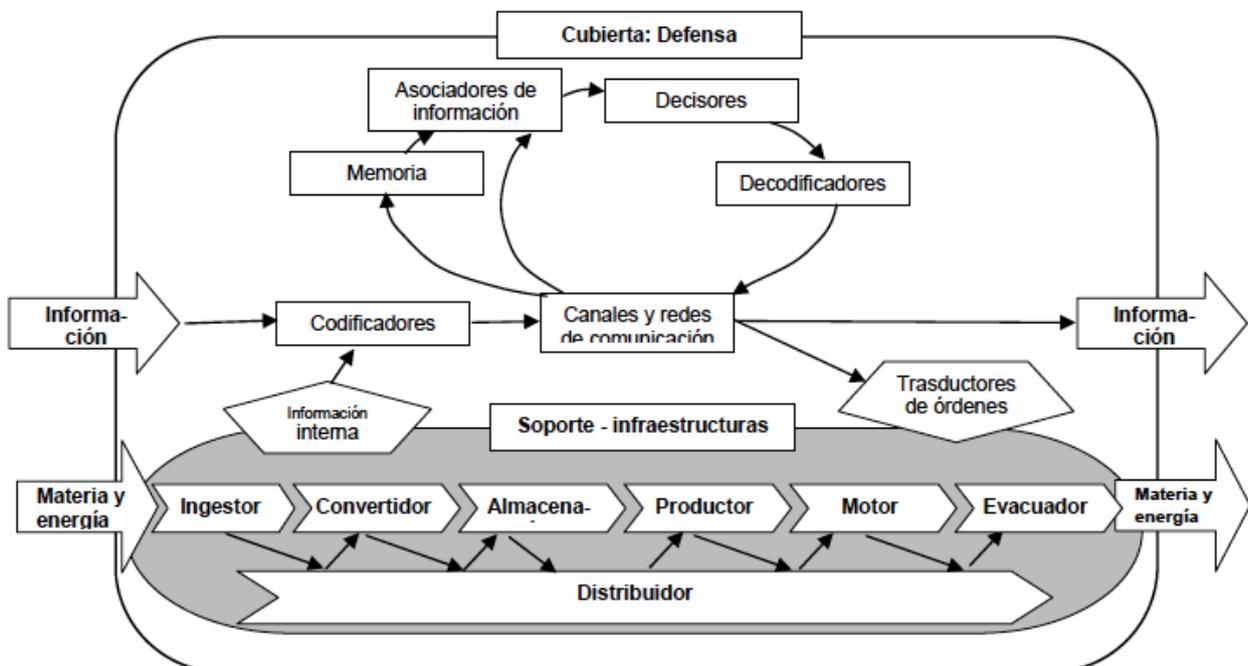
(16) Si el sistema pasa a **comportamiento no regulado** y se dispara la tendencia alcista o bajista, la función matemática que más se ajusta es la **exponencial $y=e^x+b$** . Al principio la desviación es imperceptible, pero pasando el tiempo, de modo sorprendente nos daremos cuenta de la imparable aceleración de los acontecimientos hasta llegar a cruzar el **umbral de sobrepasamiento**, más allá del cual, aunque no suceda nada aparentemente, el sistema, la organización está condenada al **inevitable desastre**.

(17) El conjunto de comportamientos que hemos explicado es aplicable a toda la cadena de seres vivos que, clasificados según su complejidad, iniciando la cadena en la **célula**, crece a través de los **órganos**, el **organismo** (o individuo), el **grupo humano** o natural, la organización, la **sociedad**, la **sociedad internacional** y finalmente **Gaia o el Planeta**.

(18) Los sistemas, como descripción del comportamiento de agentes relacionados, permiten explicar un fenómeno, un acontecimiento concreto, como puede ser una epidemia (donde hay varias organizaciones implicadas) o la bolsa de valores, o la carrera de armamentos o la competencia entre especies en un ecosistema y miles, por no decir millones de ejemplos más.

Un ejemplo de un sistema como descripción de un comportamiento entre agentes es el que se presenta en la segunda parte de esta exposición, el comportamiento de las epidemias y en concreto el modelo de simulación construido ante el desafío provocado por los casos de Ébola en España en 2014, para construir la Unidad de Alto Aislamiento del Hospital Central de la Defensa.

Esta figura representa los 19 subsistemas críticos de cualquier ser vivo, desde la célula, el órgano, el individuo, el grupo, la organización, la sociedad, la sociedad internacional y el Planeta.¹



¹ James G. Miller. The Living System, McGraw Hill, New York 1978

SEGUNDA PARTE: Modelos dinámicos en epidemiología

3. Planteamiento del problema

Pues bien, el empleo de esta técnica de simulación, que alcanzó ciertas cotas de difusión a raíz de la publicación de los estudios de Jay Forrester sobre los límites del crecimiento en 1972, la aplicamos en el proceso de elaboración del Plan Funcional para la Unidad de alta seguridad biológica en la planta 22 del Hospital Central de la Defensa, durante los años 2014 y 2015. Durante la fase de elaboración de este Plan Funcional, y con la poca experiencia que se tiene de situaciones de extrema gravedad epidémica, como fue el incidente de la epidemia de Ébola y los casos registrados en Madrid en 2014, el cálculo de las plantillas de personal fue realmente complicado, dada las extremadamente rígidas y exigentes medidas de seguridad que requieren estos enfermos.

Se contemplaban tres situaciones conforme a tres escenarios, la situación “VERDE” de funcionamiento de una planta estándar con pacientes infecciosos necesarios para tener activa la planta y entrenado al personal. Situación ÁMBAR.- Atención simultánea de 1 o 2 pacientes en aislamiento de alto nivel en el ala “B” de la planta y de 8 pacientes infecciosos o en aislamiento por sospecha de infección de alta contagiosidad en la ala “A”. Y Situación ROJA.- la circunstancia en la que se tienen 3 o más pacientes en el ala “B” y el ala “A” en condición estándar (pacientes cuarentenables), se necesita apoyo del resto de personal del Hospital, de la Sanidad Militar y de personal sanitario del resto del Sistema Nacional de Salud.

El cálculo de plantilla se podía garantizar hasta la situación ámbar. En situación Roja, cualquier previsión de necesidades se hacía imposible y había que pasar a situación de emergencia, con apoyo del resto del hospital y probablemente de personal del Sistema Nacional de Salud.

Para llegar a semejantes estimaciones, se utilizaron diversas técnicas de simulación, desde las más convencionales y simples, simulación de escenarios e hicimos un intento de simulación dinámica con el empleo de Dinámica de Sistemas. Los resultados eran igualmente desconazonadores en tanto que en situación de alta ocupación, sólo la experiencia real nos diría cómo actuar “la próxima vez”.

4. Modelos DS epidémicos básicos

Las epidemias han suscitado desde hace bastante tiempo un interés especial en averiguar cuál es su comportamiento, para poder predecir a la vista de los primeros datos de casos notificados, cuál será su comportamiento futuro, y qué se puede esperar de las diferentes medidas preventivas o curativas que se apliquen a la población objetivo.

Desde principios del Siglo XX, se vienen haciendo intentos de encontrar las funciones matemáticas que permitan predecir los comportamientos de estas crisis sanitarias.

En 1906, Brownlee, gran matemático Inglés y epidemiólogo se dedicó a estudiar curvas epidémicas de varias enfermedades tales como la viruela, el sarampión tífus en Glasgow y otras ciudades. Ese mismo año, aparece el libro de Hamer, que se admite como la primera piedra de la Teoría epidémica, la cual se basa en el estudio de tres variables, número de casos infecciosos, de susceptibles y la tasa de contagio entre casos y susceptibles.

La función inicial propuesta era la siguiente:

$$Z_{t0} = \frac{X}{m} Z_{t-1}$$

Donde:

Z_{t0} = número de casos en el periodo en estudio. X = número de susceptibles

m = constante que marca la tasa de contacto Z_{t-1}
= número de casos en el periodo anterior.

#1.- Modelo de Reed y Frost

El siguiente gran paso en la búsqueda de un modelo general de epidemias, fue dado por Lowell Reed y Wade Hampton Frost, en 1928. Cada enfermedad tiene sus características particulares respecto del modo de transmisión, reservorio, periodo de incubación, etc. Para su modelo Reed y Frost tuvieron que crear una epidemia teórica, algo así como una especie de esqueleto o modelo general en el que se pueda aplicar todo lo común a las enfermedades infectocontagiosas.²

Según esta restricción, para el modelo de Reed y Frost, debía asumirse los siguientes Considerandos:

- 1.--- La infección se propaga por contacto directo entre infectados y susceptibles.
- 2.--- Todo susceptible que haya estado en contacto con infectados desarrolla la enfermedad y además en un periodo que no excederá la Unidad de tiempo usada por el modelo.
- 3.--- El nuevo enfermo será a su vez infectante para otros susceptibles durante el periodo siguiente.
- 4.--- Después de ocurrida la enfermedad el infectado curado pasa a la condición de inmune en el periodo siguiente.
- 5.--- No hay posibilidad de portadores asintomáticos.
- 6.--- Cada individuo tiene una probabilidad fija de estar en contacto con enfermos. Esta probabilidad es constante durante todo el periodo de simulación del modelo o curso de la epidemia.
- 7.--- La unidad de tiempo es la duración de la enfermedad en su fase de contagiosidad.
- 8.--- Se asume el término de "contacto adecuado" el que establece un susceptible para transformarse en enfermo contagioso.

En el modelo se denomina "K" al promedio de contactos adecuados que un enfermo tiene con otros susceptibles. El número de casos se denomina "C". El número de contactos por UdT es C*K.

Conociéndose el número de casos en tiempo T (C_t), es posible conocer el número de casos en t+1 (C_{t+1}) que dependerá del número de casos actual, la proporción de susceptibles y la probabilidad de contagio.

La proporción de susceptibles "S" es como habitualmente la proporción entre probables y total de posibles "N-1". Es decir $S/(N-1)$.

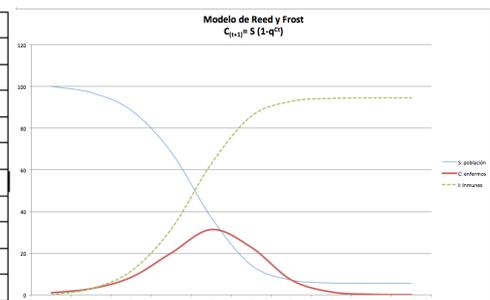
El número de casos en el periodo siguiente al actual se calcula con la fórmula:

$$C_{(t+1)} = K \frac{S}{N-1}$$

Finalmente la fórmula ejecutable del modelo de Reed y Frost es $C_{(t+1)} = S (1-q^{C_t})$, donde q es la probabilidad de escapar al contagio; de modo que $1-q$ es la probabilidad de contagio.

Como ejemplo, para una población de 101 personas, donde una contrae la enfermedad, y la probabilidad de contagio es de 0,03, el comportamiento de la epidemia sería el siguiente, según el modelo de Reed y Frost.

T	S: población	C: enfermos	I: Inmunes
1	100	1	0
2	97	3	3
3	89	8	11
4	68	20	32
5	37	31	63
6	14	23	86
7	7	7	93
8	6	1	94
9	5	0	95
10	5	0	95

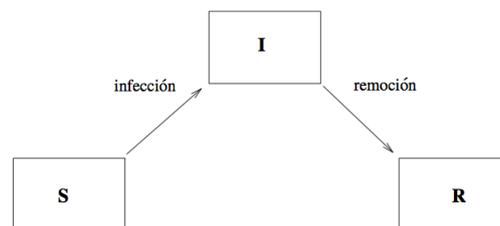


² Abbey H. 1952. An examination of the Reed-Frost theory of epidemics. Hum. Biol. 3:201

#2.- Modelo de Kermack y Mc Kendrick.

Paralelamente a Reed y Frost 1927 Kermack y McKendrick formularon un modelo matemático bastante general y complejo para describir la epidemia de peste que sufriera la India en 1906, que denominaron SIR (Susceptibles, Infectados y Recuperados).³

Kermack y McKendrick establecieron, en este caso, como postulados básicos los siguientes: a) la enfermedad que iban a estudiar debía ser viral o bacteriana y ser transmitida por contacto directo de persona a persona, b) al inicio de la epidemia solamente una fracción de la población era contagiosa, c) la población sería una población cerrada y, a excepción de las pocas personas inicialmente enfermas, todas las demás eran susceptibles de enfermarse, d) el individuo sufre el curso completo de la enfermedad para al final recuperarse (sanar) adquiriendo inmunidad, o morir y e) la población total de personas sería constante y sin dinámica demográfica.



Donde:

Susceptibles (S), estado en el cual el individuo puede ser contagiado por otra persona que esté infectada;

Infectado (I), estado durante el cual el individuo se halla infectado y puede además infectar a otros;

Recuperado (R), o curado, estado durante el cual el individuo no puede ni ser infectado por haber adquirido inmunidad (temporal o permanente) ni infectar (por haber recuperado o haber pasado la etapa contagiosa de la enfermedad).

Entre las enfermedades infectocontagiosas encontramos dos grupos principales:

- ✓✓ Las que confieren inmunidad al infectado (temporal o permanente) una vez recuperado, la mayoría de origen viral (sarampión, varicela, poliomielitis); y
- ✓✓ Las que, una vez recuperado, el individuo vuelve a ser susceptible inmediatamente, entre las que encontramos las causadas por agentes bacterianos (enfermedades venéreas, peste, algunas meningitis) o protozoos (malaria).

Teniendo en cuenta los distintos estadios relacionados con un proceso infeccioso, los modelos epidemiológicos se dividen en tres grandes grupos:

Teniendo en cuenta los distintos estadios relacionados con un proceso infeccioso, los modelos epidemiológicos se dividen en tres grandes grupos:

³ García Piñera A. Modelos de ecuaciones diferenciales para la propagación de enfermedades infecciosas. Univ. Cantabria. Tesis doctoral. 2014

SIR: El modelo susceptible---infectado---recuperado, relacionado con las enfermedades que confieren inmunidad permanente y un ciclo típico incluye los tres estados. Esto no quiere decir que todos los individuos de una población deban pasar por estos, algunos no serán infectados y permanecerán sanos, o sea siempre en estado S, otros serán inmunizados artificialmente por vacunación, o algún otro método y pasarán a ser R sin haber estado infectados.

SIRS: El modelo susceptible---infectado---recuperado---susceptible, idéntico al anterior, pero aplicable a casos en que la inmunidad no es permanente y el individuo vuelve a ser susceptible después de un cierto periodo, tal como la gripe.

SIS: El modelo susceptible---infectado---susceptible; se usan en casos en que la enfermedad no confiere inmunidad y el individuo pasa de estar infectado a susceptible nuevamente, saltando la etapa R.

El modelo de Mermack y McKendrick es tal que puede tener en cuenta la dinámica vital de la población (nacimientos, muertes, movimientos migratorios) dependiendo del horizonte temporal analizado, y de las características de la enfermedad y de la población estudiada.

Si denotamos por N a la población total al tiempo t en la que el brote epidémico puede ocurrir, y por $S_{(t)}$, $I_{(t)}$ y $R_{(t)}$ a los individuos en estados susceptible, infeccioso y recuperado o muerto al tiempo t respectivamente, entonces $N = S_{(t)} + I_{(t)} + R_{(t)}$ es constante. La tasa de infección que determina el número de individuos por unidad de tiempo que se transfieren del compartimiento de susceptibles a infecciosos depende del número de contactos per cápita c que una persona sana y susceptible tenga por unidad de tiempo, y de la proporción ϕ de estos contactos que sean con individuos infecciosos que le transmitan la enfermedad. Con este razonamiento, si denotamos por $\beta = \phi c$ a la tasa per cápita de transmisión de enfermedad, entonces la tasa de infección de la figura 2 esta dada por la expresión $\beta S_{(t)} I_{(t)}$. La tasa de recuperación o muerte la denotaremos por γ . De hecho, el inverso de esta tasa es el tiempo promedio que un individuo de la población dura enfermo (e infeccioso) cuando suponemos que la distribución de tiempos de residencia en el comportamiento de infecciosos sigue una distribución exponencial. Podemos ahora escribir la ecuación diferencial que describe el cambio en el número de individuos pertenecientes al comportamiento infeccioso.

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I, \quad I(0) = I_0$$

donde I_0 representa el número inicial de personas infecciosas en la población. Un brote epidémico se iniciará cuando el número de gente infecciosa se incremente una vez que los primeros casos son introducidos en la población (que originalmente supondremos conformada solo por gente sana y susceptible). En términos de la ecuación anterior la condición enunciada significa que buscamos condiciones para que $dI/dt > 0$.

El Modelo como tal se expresa como:

$$S' = -\beta SI, \quad I' = \beta SI - \gamma I, \quad R' = \gamma I$$

siendo S la población susceptible de enfermar, I la población infectada, y R la población que ha pasado la enfermedad y se halla recuperada. Existen dos constantes que son la tasa de infección (beta) y la tasa de curación o recuperación (gamma).

5. Modelos DS de epidemias

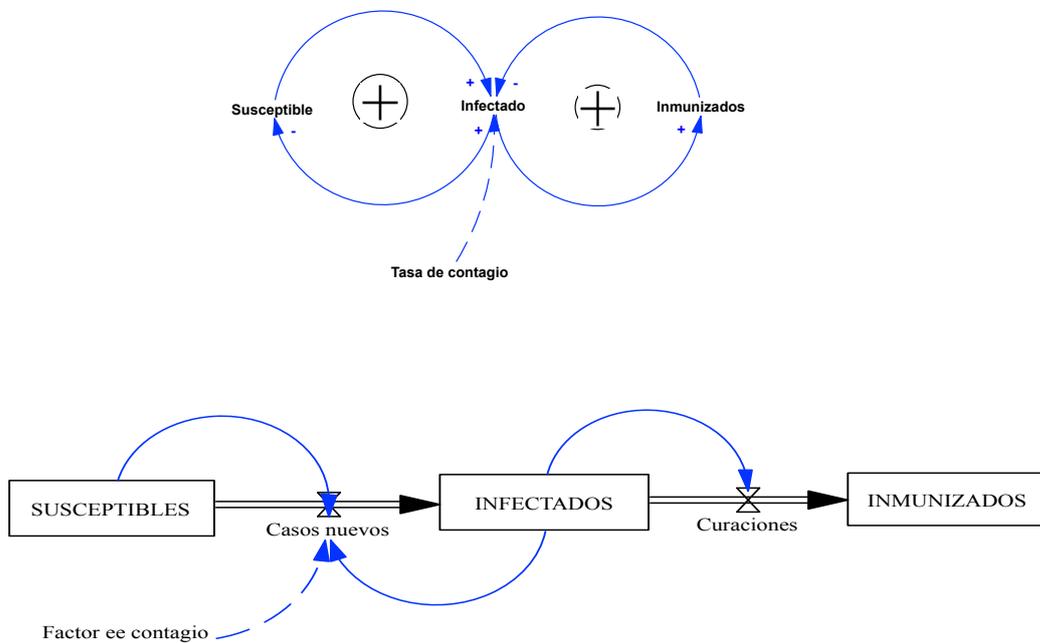
Los modelos analíticos como los vistos requieren un aparataje matemático complicado de entender para el personal poco habituado al cálculo, y por otra parte tiene una severa limitación en el número de variables a someter al cálculo.

Las técnicas DS de simulación dinámica han permitido romper ambos tipos de barrera, permitiendo poder elaborar modelos complejos sin necesidad de manejar las complejas ecuaciones analíticas, y sobre todo, poder diseñar modelos de simulación con un número virtualmente ilimitado de variables. En este sentido, la Dinámica de Sistemas de Forrester ha supuesto un espectacular avance en este sentido.

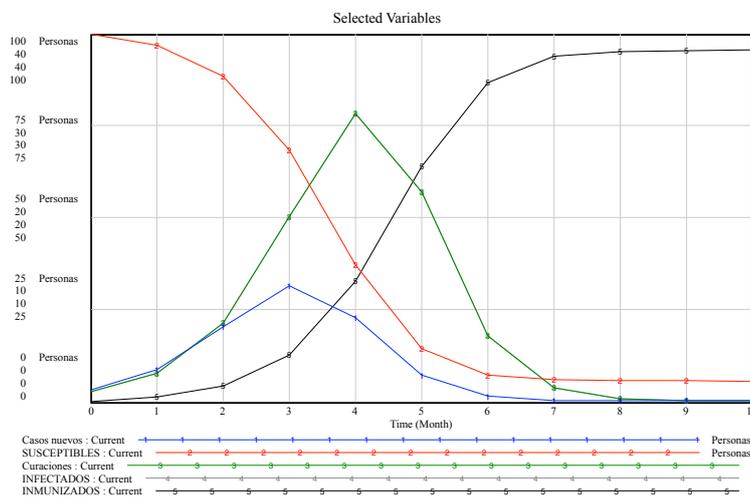
Así, el modelo de Reed y Frost, se puede pasar de su formulación analítica a su formulación dinámica utilizando los tres pasos que se emplean en los modelos DS.

Empezando por los diagramas causales, tenemos el diagrama causal de una epidemia convencional, mediante el siguiente diagrama causal.

Que se transforma en un segundo paso, en un diagrama de flujo, o de Forrester, con el siguiente aspecto:



Y el resultado, da un gráfico exactamente igual al obtenido por métodos analíticos.



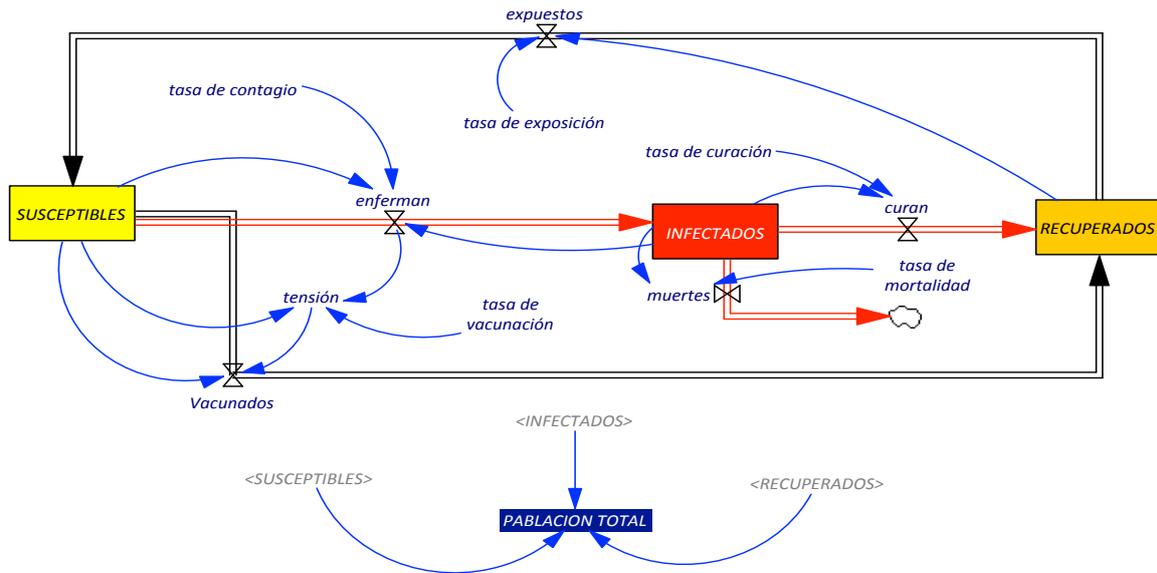
Los datos en tabla son los mismos.

Time	casos	inmunizados	susceptibles
0	3	0	100
1	8.	1	97
2	20.	4	88.
3	31.	12.	68.
4	22.	32.	37.
5	7.	63.	14.
6	1.	86.	7.
7	0.	93.	5.
8	0	95.	5.
9	0	95.	5.
10	0	95.	5.

Y las ecuaciones en lenguaje DS son las siguiente:

-
- (01) Casos nuevos=SUSCEPTIBLES*(1-Factor de contagio^INFECTADOS)
Units: Personas
- (02) Curaciones=INFECTADOS
Units: **undefined**
- (03) Factor de contagio=0.97
Units: **undefined**
- (04) FINAL TIME = 10 Units: Month The final time for the simulation.
- (05) INFECTADOS= INTEG (Casos nuevos-Curaciones, 1)
Units: Personas
- (06) INITIAL TIME = 0 Units: Month The initial time for the simulation.
- (07) INMUNIZADOS= INTEG (Curaciones,0)
Units: Personas
- (08) SAVEPER = TIME STEP Units: Month [0,?]
The frequency with which output is stored.
- (09) SUSCEPTIBLES= INTEG (-Casos nuevos,100)
Units: Personas
- (10) TIME STEP = 1 Units: Month [0,?] The time step for the simulation.
-

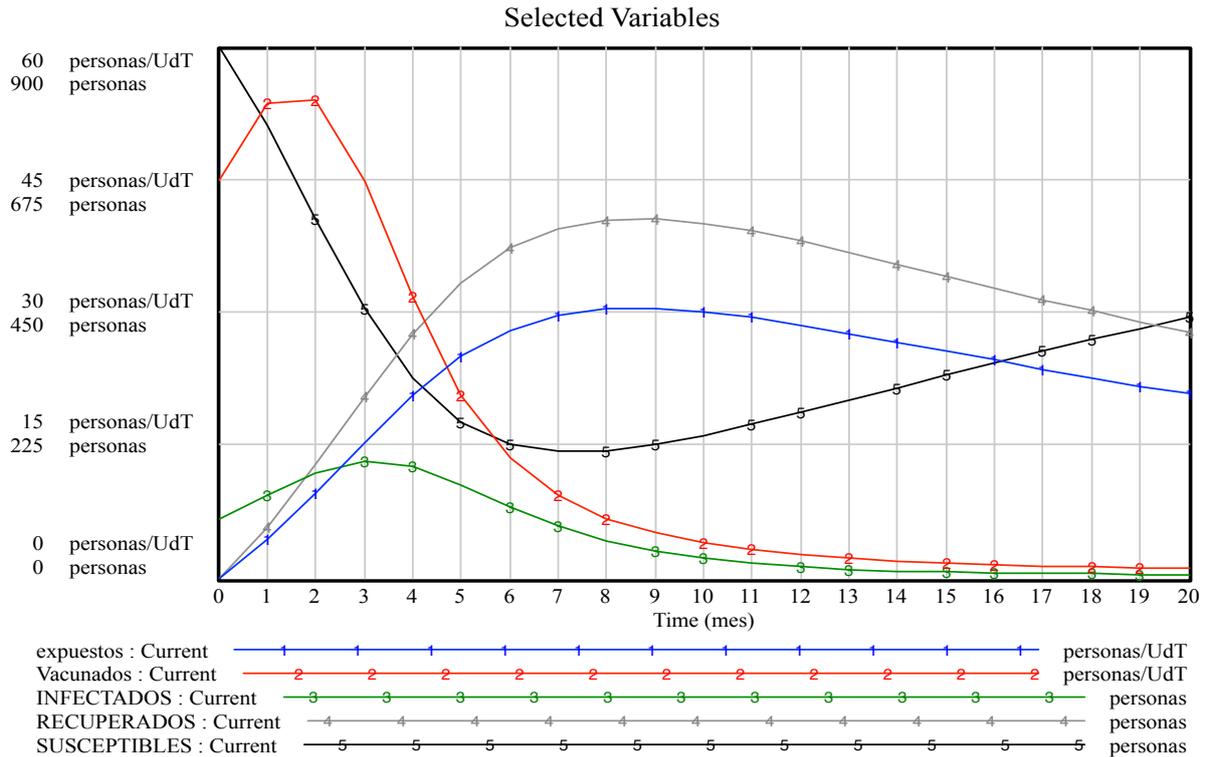
El modelo de Kermack y McKendrick, modelizado con Dinámica de Sistemas, se representa con el siguiente diagrama de Forrester.



El modelo dinámico DS es el siguiente.

-
- (01) $\text{curan} = \text{INFECTADOS} * \text{tasa de curación}$; Units: personas/UdT
- (02) $\text{enferman} = \text{SUSCEPTIBLES} * \text{INFECTADOS} * \text{tasa de contagio}$; Units: personas/UdT
Según el modelo de Kermack y Mc Kendrick $S' = -BSI$ El número de los que enferman por UdT es igual al de susceptibles por el de infectados por la tasa de contagio.
- (03) $\text{expuestos} = \text{RECUPERADOS} * \text{tasa de exposición}$; Units: personas/UdT
- (04) $\text{FINAL TIME} = 20$; Units: mes
The final time for the simulation.
- (05) $\text{INFECTADOS} = \text{INTEG}(\text{enferman} - \text{curan} - \text{muertes}, 100)$; Units: personas [50,150]
- (06) $\text{INITIAL TIME} = 0$; Units: mes The initial time for the simulation.
- (07) $\text{muertes} = \text{INFECTADOS} * \text{tasa de mortalidad}$; Units: personas/UdT
- (08) $\text{PABLACION TOTAL} = \text{INFECTADOS} + \text{RECUPERADOS} + \text{SUSCEPTIBLES}$; Units: personas
- (09) $\text{RECUPERADOS} = \text{INTEG}(\text{curan} + \text{Vacunados} - \text{expuestos}, 0)$; Units: personas
- (10) $\text{SAVEPER} = \text{TIME STEP}$; Units: mes [0,?]
The frequency with which output is stored.
- (11) $\text{SUSCEPTIBLES} = \text{INTEG}(\text{expuestos} - \text{enferman} - \text{Vacunados}, 900)$; Units: personas
- (12) $\text{tasa de contagio} = 0.001$; Units: Dmnl
- (13) $\text{tasa de curación} = 0.4$; Units: Dmnl
- (14) $\text{tasa de exposición} = 0.05$; Units: Dmnl
- (15) $\text{tasa de mortalidad} = 0.1$; Units: Dmnl
- (16) $\text{tasa de vacunación} = 0.5$; Units: Dmnl
- (17) $\text{tensión} = (\text{enferman} / \text{SUSCEPTIBLES}) * \text{tasa de vacunación}$; Units: personas [50,150]
- (18) $\text{TIME STEP} = 1$; Units: mes [0,?]
The time step for the simulation.
- (19) $\text{Vacunados} = \text{SUSCEPTIBLES} * \text{tensión}$; Units: personas/UdT
-

La representación gráfica de este modelo es la siguiente:



Donde los que se recuperan pueden volver a contraer la enfermedad, y por otra parte, los susceptibles pueden ser vacunados y hay infectados que pueden morir. Y se incluye la variable “tención” que recoge la tasa de vacunación y el cociente enferman/susceptibles. La fórmula básica de las personas vacunadas es igual al número de personas susceptibles multiplicado por la tasa de vacunación (ésta depende del tipo de enfermedad, de factores culturales, etc.), es decir: $\text{vacunadas} = \text{susceptibles} \times \text{tasa de vacunación}$. Deseamos introducir en esta ecuación el hecho de que las personas se vacunan más cuando perciben que existe un riesgo importante de contraer la enfermedad. Calculamos este riesgo como el cociente enferman/susceptibles, que indica cuantas personas enferman en relación a la cantidad de personas que pueden enfermar.

De este modo, el modelo de Kermack y McKendrick, pasa de ser un frío modelo analítico, a un modelo de simulación, que puede ser enriquecido con una cantidad de variables, tasas y constantes que se ajustan mucho más a la realidad de la enfermedad infecto contagiosa.

6. Aplicación de DS al diseño de la Unidad de Alto Aislamiento

El objeto de este ensayo es efectuar una extensión del modelo de Kermack y McKendrick, para el estudio y simulación de una supuesta epidemia de una enfermedad infecto contagiosa importada en España a través de un caso, que genera la activación de una alerta sanitaria, y de la Planta de hospitalización para enfermos que requieran aislamiento estricto (UAAN: Unidad de Aislamiento de Alto Nivel), como la diseñada para el Hospital Central de la Defensa, con 16 habitaciones de aislamiento estricto. Con este modelo se pretende conocer la capacidad funcional de la UAAN del Hospital Central de la Defensa, y la situación que se estaría viviendo fuera del hospital; hasta qué punto es controlable la situación con medidas convencionales y de riguroso cumplimiento de los protocolos de seguridad, así como la evaluación de riesgos.

7. Material y método

Se utiliza un ordenador personal convencional que soporte Windows 7 o Mac iOS.

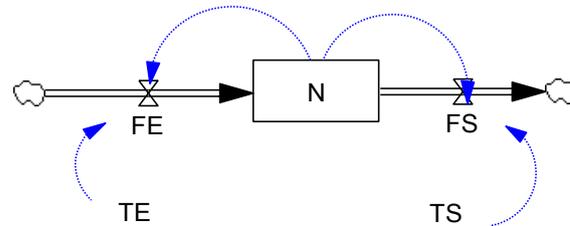
Se emplea como metodología de simulación, la técnica de Dinámica de Sistemas con el aplicativo de simulación, VensimPlus 6.2®.

La metodología de Dinámica de Sistemas (DS) fue desarrollada en los años 50 por el equipo de Jay Forrester, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), a propósito de problemas relacionados con los sistemas de

producción y logística industrial. Posteriormente se amplió su aplicación al campo de la dinámica poblacional y urbana, hasta convertirse en una esencial herramienta de prospectiva empleada para la elaboración del primer informe al Club de Roma.

En esencia, DS se basa en la resolución de ecuaciones diferenciales, donde las variables toman valor en función del tiempo: dV/dt .

Para ello se emplea una estructura basada en la descomposición de estas ecuaciones en el cálculo de dos tipos de variables, de nivel o estado, y de flujo o transferencia.



$$N_{(t)} = N \int_0^t (FE - FS) dt$$

Es decir: $\frac{dN}{dt} = FE - FS$

DS utiliza el método de integración de Euler para la resolución de estas ecuaciones:

$$N_{(t+\Delta t)} = N_{(t)} + \Delta t [FE_{(t)} - FS_{(t)}]$$

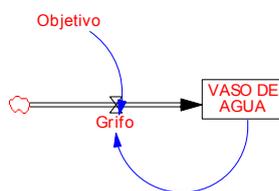
A su vez, las vables de flujo se calculan en función de los valores previos de las de Nivel y habitualmente afectadas de otras variables auxiliares o bien de coeficientes fijos.

$$FE_{(t+\Delta t)} = N_t TE, \quad FS_{(t+\Delta t)} = N_t TS$$

El sintaxis DS, el sistema se describe de la siguiente forma:

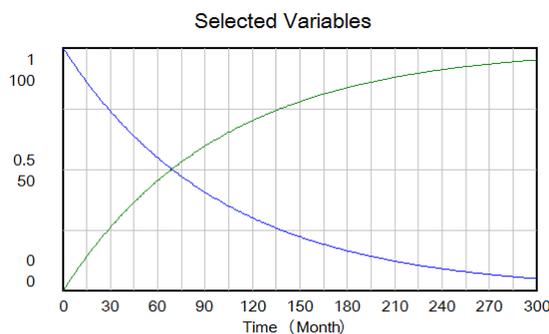
- (01) $FE = N * TE$
- (02) $FS = N * TS$
- (03) $N = \text{INTEG} (FE - FS, 1)$ (Esta ecuación es la que soluciona la integral)
- (04) $TE = 0.2$
- (05) $TS = 0.1$
- (08) $\text{TIME STEP} = 1$

El ejemplo más sencillo de un modelo DS lo tenemos en el llenado de un vaso de agua, donde existe un objetivo final que es el llenado completo.



- | | |
|-----|--|
| (1) | FINAL TIME = 300 |
| (2) | Grifo=(Objetivo-VASO DE AGUA)/Objetivo |
| (3) | INITIAL TIME = 0 |
| (4) | Objetivo= 100 |
| (6) | TIME STEP = 1 |
| (7) | VASO DE AGUA= INTEG (Grifo,0) |

El resultado gráfico es un proceso de llenado que va disminuyendo hasta que se alcanza el llenado completo.



8. Resultados

El modelo "Epidemias", se basa en un conjunto de ecuaciones diferenciales que definen el valor de las variables de nivel, sobre la base de la variación de las correspondientes variables de flujo, auxiliares y calibrado de tasas.

#1.- Conjunto básico de variables

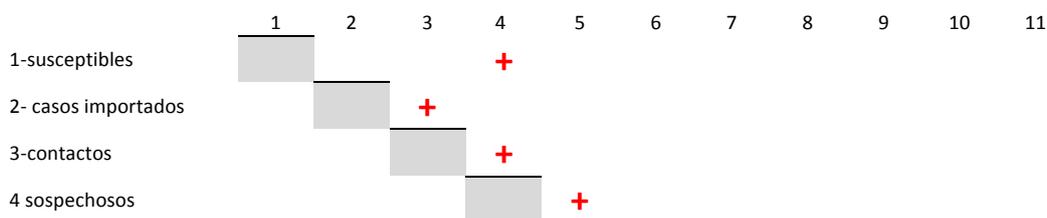
Se desarrolla un primer modelo de simulación, basado en origen en el modelo de Kermack y McKendrick, pero ampliado gracias a las posibilidades de refinamiento que permite la metodología de Dinámica de Sistemas. Así, las tres variables **SIR** (Susceptibles, Infectados y Recuperados), se han convertido en las siguientes.

- 1.- **Susceptibles** (Vble. de Nivel que refleja la población general que no tiene defensas biológicas para rechazar el contagio).
- 2.- **Casos importados** (Vble. de flujo que indica los casos que proceden del exterior a la comunidad, por lo general se parte de un caso cero)
- 3.- **Contactos** (Vble. de flujo: nuevos casos por Unidad de tiempo de población susceptible que entra en contacto con el caso cero inicialmente y posteriormente con enfermos infecciosos contagiosos no controlados por los servicios de salud).
- 4.- **Sospechosos** (Vble. de nivel: Población que ha entrado en contacto con enfermos contagiosos sin otro atributo clínico).
- 5.- **Cuarentenables** (Vble. De nivel: población identificada como de riesgo y sometida a aislamiento preventivo por los servicios de salud y de protección civil).
- 6.- **Hospitalizados** (Vbles. De Nivel que indican el número de casos que muestran síntomas de enfermedad, son presuntamente contagiosos e ingresan en unidades de aislamiento de alto Nivel de Seguridad biológica (UAAN). Estos pacientes se han desagregado en tres tipos por su situación clínica, basales, críticos y en recuperación).
- 7.- **Fallecidos** (Vble. de nivel: enfermos que finalmente mueren debido a la enfermedad)
- 8.- **Recuperados** (Vble. de nivel: pacientes que se han curado, y quedan inmunizados)
- 9.- **Vacunados** (Vble. de flujo: pacientes que reciben la vacuna de modo preventivo y quedan inmunizados sin padecer ni tener riesgo de sufrir la enfermedad)
- 10.- **Personal Sanitario** (Vble. de nivel: activos sanitarios que se incorporan a la UAAN para atender a pacientes hospitalizados)
- 11.- **Seguridad** (Vble. auxiliar: indica el nivel de seguridad con el que se trabaja en la UAAN).

Todas las variables están relacionadas entre sí mediante relaciones directa (si aumenta/disminuye la primera, aumenta/disminuye la segunda) o inversamente proporcional (si aumenta/disminuye la primera, disminuye/aumenta la segunda,

El conjunto de relaciones causales, genera un diagrama de causalidad que permite mostrar gráficamente el conjunto de relaciones de todas las variables con todas. Permite identificar bucles reforzadores (crecimiento continuo) o compensadores (tienden a la estabilidad).

La tabla de relaciones es la siguiente:



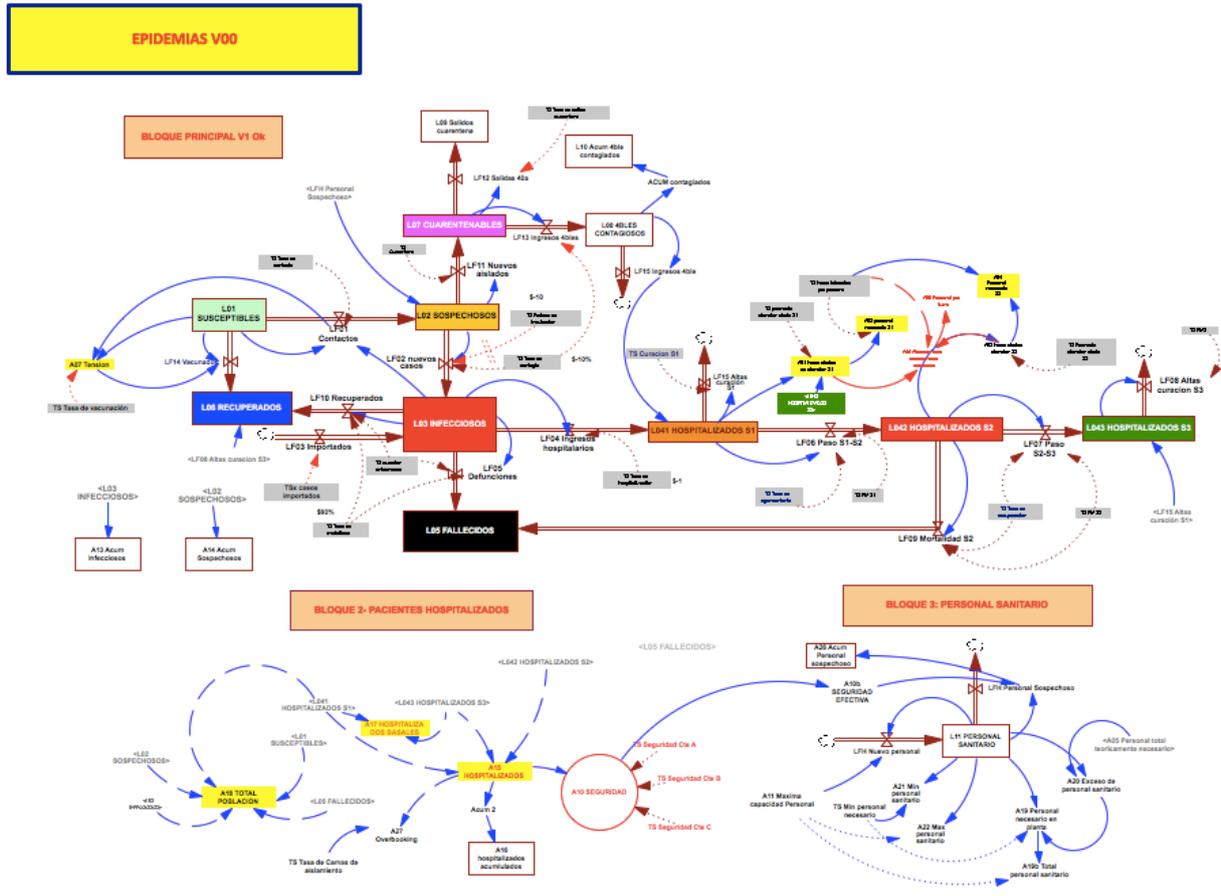
dependiendo de la investigación que se logre llevar a cabo, puede que sean identificados o no. En el modelo se le asigna una tasa de cuarentena (0-1) que es la proporción de éxito en la identificación de contactos.

4. Los casos contacto de ser identificados, deben pasar a la situación de aislamiento preventivo o cuarentenable, en el que deben permanecer tantos días como marque el periodo de incubación de la enfermedad, antes de presentar síntomas. Estos días son fijados por la tasa de incubación o días de salida de cuarentena.
5. Una proporción sospechosos en cuarentena desarrollarán la enfermedad, lo que obliga a su ingreso en la UAAN. La tasa que se aplica de contagiosidad es la misma que la de los susceptibles no identificados que se contagian y contraen la enfermedad.
6. Igualmente una proporción de contactos no identificados, desarrollarán la enfermedad y contribuirán a generar nuevos contactos y nuevos casos. La tasa utilizada es la Tasa de contagio, por un lado y la de contactos por otro.
7. Caso de haber vacuna, tanto más casos se produzcan, mayor será la demanda de vacunación, a lo que se denomina tensión, que obliga a proceder a la campaña de vacunaciones.
8. En la UAAN, los enfermos pasarán básicamente por tres estadios, el basal, en el que son relativamente autónomos, y precisan asistencia médica y cuidados de enfermería relativamente asumibles. El estado crítico, donde presentan signos evidentes de agravamiento y peligro vital, y el estado de recuperación, una vez superada la fase crítica, en el que los niveles de asistencia vuelven a ser los mismos que en el caso de la situación basal inicial.
9. El personal médico necesario para atender a los pacientes aislados en la UAAN está en función del número de pacientes y de su situación clínica. Es aquí donde entra en juego dos variables de suma importancia, la cantidad de personal sanitario y las medidas de seguridad estrictas que han de cumplirse, y que en sana lógica, son del 100% (98% porque la seguridad total no existe), y que puede verse peligrosamente disminuida en la medida en que aumentan los enfermos, se incrementa el personal necesario para atenderlos con su consiguiente y peligroso "hacinamiento", y el tiempo para llevar a cabo las tareas de descontaminación personal y de los instrumentos utilizados comienza a disminuir, por incrementarse la demanda de tareas.
10. Todo ello obliga a plantear dónde se establece la frontera entre una situación de riesgo ámbar, asumible y la siguiente de riesgo rojo, no asumible. Este es uno de los objetivos del desarrollo del modelo. Cuál es el nivel de minoración de la seguridad asumible.

La credibilidad de este modelo es el resultado de dos factores críticos, el primero es su lógica, conseguida mediante el adecuado planteamiento de las variables y las relaciones respectivas, representadas en el conjunto de ecuaciones. El segundo es el calibrado del modelo, representado por la fijación adecuada de las tasas o parámetros.

Se parte de una situación incómoda, que es la escasa o casi nula experiencia de una epidemia acaecida en un escenario sanitario altamente tecnificado y con múltiples recursos para neutralizar las amenazas. En especial, se parte en el caso concreto de la Unidad de aislamiento de alto nivel del Hospital Central de la Defensa, tan sólo del caso aislado de Ébola tratado en el Hospital Carlos III, que en principio no es representativo de estas situaciones. Por todo ello, el calibrado del modelo es básicamente empírico, según la opinión de los expertos.

#4.- Modelo dinámico (Diagrama de Forrester)



El modelo DS representado en este diagrama de Forrester tiene para su comprensión tres bloques, uno principal y dos secundarios (pacientes y personal)

El bloque principal describe la secuencia de la enfermedad, desde el caso cero, pasando por todos los estadios descritos hasta su resolución, bien como recuperados o fallecidos.

Los hospitalizados en el modelo se plantean sobre tres situaciones "S1" son infecciosos en fase inicial sin desarrollo de una clínica agravada. "S2" son enfermos con una clínica de gravedad, que necesitan cuidados críticos. "S3" son enfermos que han superado esta fase y se supone entran en situación de recuperación hasta ser dados de alta. El personal necesario para su cuidado será diferente según el estadio clínico en el que se encuentren.

Los elementos con fondo gris son tasas o parámetros constantes que permiten calibrar el modelo. Los elementos amarillos son variables auxiliares. Los elementos vinculados al símbolo X, el grifo, son las variables de flujo que inducen la variabilidad de las variables de nivel. En términos analíticos, las que determinan los incrementos (Δx) en función del tiempo ($\Delta x / \Delta t$), y en el extremo, a efectos de integración (dx/dt). De este modo el proceso de integración se consigue mediante el acoplamiento de las ecuaciones de nivel y de flujo.

#5.- Sistema de ecuaciones

Para el modelo, existen en este caso 83 funciones, bien sean variables de nivel, de flujo, auxiliares, tasas o límites de tiempo.

La siguiente relación muestra este conjunto de funciones:

Variables auxiliares

- (01) **A01 horas diarias de atención S1**= $21*(L041 \text{ HOSPITALIZADOS S1}+L043 \text{ HOSPITALIZADOS S3})^2+9*(L041 \text{ HOSPITALIZADOS S1}+L043 \text{ HOSPITALIZADOS S3})+178$
Units: horas diarias
REM: Total de horas de cuidados en planta para atender a enfermos basales $y = 21x^2 + 9x + 178$, $R^2 = 1$. La función polinómica se ha determinado de los estudios elaborados con el modelo de actividad de ISDEFE. Cap 25, #1 Pacientes en situación basal: Se analiza el caso del ingreso de pacientes en estado basal, mediante la línea de tendencia se puede estimar el personal necesario en función del número de pacientes. Atendiendo a un número de personal necesario máximo dedicado de 80 personas (Personal HCD Gómez Ulla), a partir de este límite se pasaría a alerta roja.
- (02) **A02 personal necesario S1**=**A01 horas diarias de atención S1/TS horas laborales por persona**
Units: horas diarias
REM: personal necesario para atender a pacientes basales. Calculado mediante la ratio, horas necesarias entre horas de trabajo diarias de cada persona (TS horas laborables por persona)
- (03) **A03 horas diarias atención S2**= $-50*L042 \text{ HOSPITALIZADOS S2}^2+400*L042 \text{ HOSPITALIZADOS S2}+TS \text{ Promedio atención diaria S2}$
Units: horas diarias
REM: Horas totales de cuidados en planta para enfermos en cuidados críticos $y = -50x^2 + 400x$ $R^2 = 1$
- (04) **A04 Personal necesario S2**=**A03 horas diarias atención S2/TS horas laborales por persona**
Units: Personal sanitario
REM: personal necesario para asistir en un día a pacientes críticos
- (05) **A05 Personal total teóricamente necesario (A01 horas diarias de atención S1+A03 horas diarias atención S2)/TS horas laborales por persona**
Units: Personal sanitario
REM: Personal teóricamente necesario para atender a los enfermos
- (06) **A06 Personal por turno**= **A05 Personal total teóricamente necesario/3**
Units: Personal sanitario
REM: personal total teóricamente necesario por turno (tres turnos de 8 horas que cubren 24 horas)
- (07) **A07 Tensión**=(**LF01 Contactos/L01 SUSCEPTIBLES**)***TS Tasa de vacunación**
Units: Dmnl
REM: Se incluye la variable "tensión" que recoge la tasa de vacunación y el cociente enferman/susceptibles La fórmula básica de las personas vacunadas es igual al número de personas susceptibles multiplicado por la tasa de vacunación (ésta depende del tipo de enfermedad, de factores culturales, etc.), es decir: vacunadas=susceptibles x tasa de vacunación. Deseamos introducir en esta ecuación el hecho de que las personas se vacunan más cuando perciben que existe un riesgo importante de contraer la enfermedad. Calculamos este riesgo como el cociente enferman/susceptibles, que indica cuantas personas enferman en relación a la cantidad de personas que pueden enfermar.
- (08) **A10 SEGURIDAD**= if then else(**TS Seguridad Cte A*****A15 HOSPITALIZADOS**²+**TS Seguridad Cte B*****A15 HOSPITALIZADOS**+**TS Seguridad Cte C**)/**100**<**0,0**,(**TS Seguridad Cte A*****A15 HOSPITALIZADOS**²+**TS Seguridad Cte B*****A15 HOSPITALIZADOS**+**TS Seguridad Cte C**)/**100**)
Units: Dmnl
REM: Parábola inversa de seguridad. Se aplica la parábola inversa $y=-AX^2+BX+C$, bajo la hipótesis de que a mayor cantidad de pacientes ingresados, las tareas necesitan hacerse con mayor celeridad lo que conlleva un riesgo cierto de disminución de la seguridad, que afectará a la seguridad del personal sanitario, con posibilidad de que entre él, surjan contagios.
- (09) **A10b SEGURIDAD EFECTIVA**= if then else(**A10 SEGURIDAD**>**0.8**,**1**, **A10 SEGURIDAD*****100**)
Units: Dmnl
- (10) **A11 Maxima capacidad Personal**= **150**
Units: Personal sanitario
REM: Máxima capacidad de operatividad en planta (tres turnos). Más allá del cual, se considera la planta inmanejable y peligrosa por razones de seguridad.
- (11) **A13 Acum Infecciosos**= INTEG (INTEG(**L03 INFECCIOSOS**),**0**)
Units: personas
- (12) **A14 Acum Sospechosos**= INTEG (INTEG(**L02 SOSPECHOSOS**),**0**)
Units: personas
- (13) **A15 HOSPITALIZADOS**=**L041 HOSPITALIZADOS S1+L042 HOSPITALIZADOS S2+L043 HOSPITALIZADOS S3**
Units: personas en UAAN
REM: Total de hospitalizados en UAAN
- (14) **A16 hospitalizados acumulados**= INTEG (+**A15 HOSPITALIZADOS**,**0**)

- Units: personas en UAAN
REM: acumulado de personas hospitalizadas en UAAM durante la epidemia.
- (15) **A17 HOSPITALIZADOS BASALES=L041 HOSPITALIZADOS S1+L043 HOSPITALIZADOS S3**
Units: personas en UAAN
REM: Hospitalizados en UAAM en situación basal, previa y posterior al estado crítico
- (16) **A18 TOTAL POBLACION=L03 INFECCIOSOS+L05 FALLECIDOS+L01 SUSCEPTIBLES+L02 SOSPECHOSOS+L041 HOSPITALIZADOS S1**
Units: personas
REM: Población total en todas las categorías posibles.
- (17) **A19 Personal necesario en planta= if then else(L11 PERSONAL SANITARIO>TS Min personal necesario , TS Min personal necesario , ((TS Min personal necesario+A20 Exceso de personal sanitario+L11 PERSONAL SANITARIO)))**
Units: Personal sanitario
REM: Personal que se necesitaría tener para atender a todos los pacientes ingresados. Es un número teórico si supera el máximo admisible definido en A11 Maxima capacidad de personal
- (18) **A19b Total personal sanitario=if then else(A19 Personal necesario en planta>A11 Maxima capacidad Personal , A11 Maxima capacidad Personal , A19 Personal necesario en planta)**
Units: Personal sanitario
REM: personal que debiendose tener, no puede trabajar por imposibilidad de material y espacio.
- (19) **A20 Exceso de personal sanitario=A05 Personal total teoricamente necesario-L11 PERSONAL SANITARIO**
Units: Personal sanitario
REM: personal que debiendose tener, no puede trabajar por imposibilidad de material y espacio.
- (21) **A22 Max personal sanitario=MAX(A11 Maxima capacidad Personal, L11 PERSONAL SANITARIO)**
Units: Personal sanitario
REM: el máximo entre la plantilla necesaria y la máxima admisible
- (22) **A26 Acum Personal sospechoso= INTEG (LFH Personal Sospechoso,0)**
Units: Personal sanitario
REM: Acumulado de personal sanitario probablemente infectado
- (23) **A27 Overbooking=A15 HOSPITALIZADOS-16**
Units: camas
REM: Sobrecapacidad del hospital por encima de las 16 camas
- (24) **Acum 2=if then else(A15 HOSPITALIZADOS<1, 0, A15 HOSPITALIZADOS)**
Units: **undefined**
- (25) **ACUM contagiados= if then else(L08 4BLES CONTAGIOSOS<1,0, L08 4BLES CONTAGIOSOS)**
Units: **undefined**

Horizonte temporal

- (26) **FINAL TIME = 365**
Units: Day
The final time for the simulation.
- (27) **INITIAL TIME = 0**
Units: Day
The initial time for the simulation.

Variables de nivel

- (28) **L01 SUSCEPTIBLES= INTEG (INTEGER(-LF01 Contactos-LF14 Vacunados),10000)**
Units: personas
REM: Población general susceptible de contraer la enfermedad
- (29) **L02 SOSPECHOSOS= INTEG (LF01 Contactos-LF02 nuevos casos-LF11 Nuevos aislados,0)**
Units: personas
REM: Aquellas personas que han entrado en contacto con un enfermo contagioso, pero aún no son sintomáticos ni presentan pruebas que puedan confirmar la enfermedad.
- (30) **L03 INFECCIOSOS= INTEG ((LF02 nuevos casos+LF03 Importados)-(LF05 Defunciones+LF10 Recuperados+LF04 Ingresos hospitalarios),0)**
Units: personas
REM: Personas sintomáticas de la enfermedad y que pueden transmitirla
- (31) **L041 HOSPITALIZADOS S1= INTEG (LF04 Ingresos hospitalarios+LF15 Ingresos 4ble-"LF06 Paso S1-S2"-LF15 Altas curación S1,0)**

Units: personas en UAAN

REM: Hospitalizados en UAAN en estadio 1. basal: Es autónomo y puede moverse y alimentarse por sí mismo.

- (32) **L042 HOSPITALIZADOS S2= INTEG ("LF06 Paso S1-S2"-(LF09 Mortalidad S2+"LF07 Paso S2-S3"),0)**
Units: personas en UAAN
REM: Pacientes hospitalizados en UAAN en estado crítico. Requiere de sonda nasogástrica para alimentarse, lo que requiere de intervención de enfermería para cambio de dicha alimentación cada 6 horas.
- (33) **L043 HOSPITALIZADOS S3= INTEG ("LF07 Paso S2-S3"+LF15 Altas curación S1-LF08 Altas curacion S3,0)**
Units: personas en UAAN
REM: Hospitalizados en UAAN, en fase de recuperación. Vuelven a estar en estado basal. Son autónomos. También entran en este nivel los enfermos que no han entrado en fase crítica.
- (34) **L05 FALLECIDOS= INTEG (+LF05 Defunciones+LF09 Mortalidad S2,0)**
Units: personas
REM: Personas que han muerto por causa de la enfermedad
- (35) **L06 RECUPERADOS= INTEG (LF08 Altas curación S3+LF10 Recuperados+LF14 Vacunados+LF08 Altas curacion S3,0)**
Units: personas
REM: Personas que consiguen superar la enfermedad.
- (36) **L07 CUARENTENABLES= INTEG (LF11 Nuevos aislados-(LF12 Salidas 40a+LF13 Ingresos 4bles),0)**
Units: personas
REM: Personas sometidas a aislamiento bajo sospecha de haber entrado en contacto con enfermos contagiados.
- (37) **L08 4BLES CONTAGIOSOS= INTEG (INTEGER(LF13 Ingresos 4bles-LF15 Ingresos 4ble),0)**
Units: personas
REM: Personas que durante la cuarentena han contraído la enfermedad, y pasan a fase de contagiosidad. Deben ser hospitalizados en unidades de aislamiento de alto nivel (UAAN)
- (38) **L09 Salidos cuarentena= INTEG (LF12 Salidas 40a,0)**
Units: personas
REM: personas sometidos a cuarentena, que tras superarla, no han manifestado síntoma alguno de la enfermedad.
- (39) **L10 Acum 4ble contagiados= INTEG (L08 4BLES CONTAGIOSOS,0)**
Units: personas
REM: Acumulados de cuarentenables que han contraído la enfermedad
- (40) **L11 PERSONAL SANITARIO= INTEG (LFH Nuevo personal-LFH Personal Sospechoso,40)**
Units: Personal sanitario [40,150]
REM: Personal que se necesita en planta para atender a los pacientes. Hay un mínimo de 40 personas y un máximo de 150.

Variables de flujo

- (41) **LF01 Contactos=if then else(L01 SUSCEPTIBLES<=0,0,(TS Tasa de contacto*L03 INFECCIOSOS))**
Units: personas
REM: Número de posibles contagios que se dan en la población por U de T
- (42) **LF02 nuevos casos= INTEGER(L02 SOSPECHOSOS*TS Tasa de contagio/TS Periodo de incubacion)**
Units: personas
REM: Nuevos casos de entre los sospechosos por UdT
- (43) **LF03 Importados=PULSE(10 , 1)*1**
Units: personas
REM: Casos que surgen en la comunidad. Se desconoce el origen, pero son casos cero desde donde se propagará la epidemia.
- (44) **LF04 Ingresos hospitalarios=L03 INFECCIOSOS*TS Tasa de hospitalización**
Units: personas en UAAN
REM: Casos ingresados en Unidades de Aislamiento de Alto Nivel (UAAN) por UdT
- (45) **LF05 Defunciones= INTEGER(L03 INFECCIOSOS*TS Tasa de mortalidad/TS duracion enfermedad)**
Units: personas
REM: Fallecidos sin ser atendidos en hospitales por UdeT
- (46) **"LF06 Paso S1-S2"=(L041 HOSPITALIZADOS S1*TS Tasa de agravamiento)/TS EM S1**
Units: personas en UAAN
REM: Pacientes ingresados en UAAN que pasan a la fase crítica de la enfermedad. por UdT
- (47) **"LF07 Paso S2-S3"=(L042 HOSPITALIZADOS S2*TS Tasa de recuperacion)/TS EM S2**
Units: personas en UAAN

REM: Pacientes críticos que superan esta fase y pasan a la de recuperación final de la enfermedad por UdT

- (48) **LF08 Altas curacion S3=ABS(L043 HOSPITALIZADOS S3/TS EM3)**
Units: personas en UAAN
REM: pacientes hospitalizados en UAAN, que tras padecer la enfermedad incluida la fase crítica, han conseguido superarla y son dados de alta por UdT
- (49) **LF09 Mortalidad S2=(L042 HOSPITALIZADOS S2*(1-TS Tasa de recuperacion))/TS EM S2**
Units: personas en UAAN
REM: Pacientes que mueren en estado crítico en el UAAN
- (50) **LF10 Recuperados=if then else((L03 INFECCIOSOS)<=0,0,(L03 INFECCIOSOS*(1-TS Tasa de mortalidad)/TS duracion enfermedad))**
Units: personas
REM: Personas que se recuperan tras contraer la enfermedad después de padecerla, durante un tiempo determinado, y por UdT.
- (51) **LF11 Nuevos aislados=L02 SOSPECHOSOS*TS Cuarentena**
Units: personas
REM: Personas sometidas a aislamiento de cuarentena por U d T
- (52) **LF12 Salidas 40a=L07 CUARENTENABLES/TS Tasa de salida cuarentena**
Units: personas
REM: Personas cuarentenables que salen de ella sin síntomas, por UdT
- (53) **LF13 Ingresos 4bles= INTEGER(L07 CUARENTENABLES*TS Tasa de contagio**
Units: personas
REM: Ingresos hospitalarios de personas en cuarentena, que terminan manifestando síntomas de la enfermedad, por UdT.
- (54) **LF14 Vacunados=L01 SUSCEPTIBLES*A07 Tensión**
Units: personas
REM: Personas vacunadas por UdT
- (55) **LF15 Altas curación S1=L041 HOSPITALIZADOS S1*TS Curacion S1**
Units: personas en UAAN
REM Pacientes que superan la enfermedad sin entrar en la fase crítica por UdT
- (56) **LF15 Ingresos 4ble=L08 4BLES CONTAGIOSOS**
Units: personas
REM: Personas en cuarentena que sufriendo síntomas son ingresados en UAAN por UdT
- (57) **LFH Nuevo personal= if then else(((A11 Maxima capacidad Personal-L11 PERSONAL SANITARIO)/A11 Maxima capacidad Personal)<1, 0, (A11 Maxima capacidad Personal-L11 PERSONAL SANITARIO)/A11 Maxima capacidad Personal)**
Units: Personal sanitario
REM: Máximo personal admisible en planta, por encima del cual, se producen colisiones de actividades incompatibles con una mínima calidad de la asistencia. por UdT
- (58) **LFH Personal Sospechoso=L11 PERSONAL SANITARIO*((1-A10 SEGURIDAD)/10)**
Units: Personal sanitario

Incrementos de tiempo

- (59) **SAVEPER = TIME STEP**
Units: Day [0,?]
The frequency with which output is stored.
- (60) **TIME STEP = 1**
Units: Day [0,?]
The time step for the simulation.

Tasas o parámetros constantes

- (61) **TS Cuarentena=1**
Units: Dmnl
REM: Tasa de aislamiento (0 a 1) 0= no se somete a aislamiento a nadie, 1= se somete a aislamiento a todo sospechoso.
- (62) **TS Curacion S1=0.4**
Units: Dmnl
REM: Tasa de curación habiendo evitado la fase crítica
- (63) **TS duracion enfermedad=7**
Units: Day

REM: Duración de la enfermedad tras la cual, sin ser atendido, el enfermo muere o se recupera

- (64) **TS EM S1=7**
Units: Day
REM: Estancia media en estado inicial basal
- (65) **TS EM S2= 7**
Units: Dmnl
REM: Estancia media en estado crítico
- (66) **TS EM3=7**
Units: Dmnl
REM: Estancia media en estado de recuperación
- (67) **TS horas laborales por persona=8**
Units: horas diarias
REM: Jornada laboral del personal (8 horas por turno)
- (68) **TS Min personal necesario=40**
Units: Personal sanitario
REM: plantilla mínima de la planta sumados los tres turnos
- (69) **TS Periodo de incubación=10**
Units: Day
REM: Periodo en el que un sospechoso puede contrar la enfermedad en días
- (70) **TS promedio atención diaria S1=0**
Units: horas diarias
REM: Horas diarias totales que un paciente en estado basal necesita de médicos, enfermeros, auxiliares y limpiadores
 $y = 21x^2 + 9x + 178$ $R^2 = 1$ (208-280-394): Se analiza el caso del ingreso de pacientes en estado basal, mediante la línea de tendencia se puede estimar el personal necesario en función del número de pacientes. Atendiendo a un número de personal necesario máximo dedicado de 80 personas (Personal HCD Gómez Ulla), a partir de este límite se pasaría a alerta roja.
- (71) **TS Promedio atención diaria S2=0**
Units: horas diarias
REM: Media diaria de tiempo de atención que requiere un enfermo en estado crítico $y = -50x^2 + 400x$ $R^2 = 1$
- (72) **TS Seguridad Cte A = -0.01**
Units: Dmnl
REM: Cte A de la parábola inversa de seguridad
- (73) **TS Seguridad Cte B= 0.01**
Units: Dmnl
REM: Cte B de la parábola inversa de seguridad
- (74) **TS Seguridad Cte C= 1**
Units: Dmnl
REM: Cte C de la parábola inversa de seguridad
- (75) **TS Tasa de agravamiento=0.5**
Units: Dmnl
REM: Porcentaje de pacientes que se agravan (0.5= 50%)
- (76) **TS Tasa de Camas de aislamiento=8**
Units: ** Dmnl **
REM: Camas disponibles para ingreso de alta seguridad
- (77) **TS Tasa de contacto= 10**
Units: personas
REM: Es la media de contactos que establece diariamente un contagioso con personas sanas y que pueden contraer, o no, la enfermedad
- (78) **TS Tasa de contagio= 0.1**
Units: Dmnl
REM: Cte. Porcentaje de sospechosos que contraen la enfermedad en tantos por uno.
- (79) **TS Tasa de hospitalización=1**
Units: Dmnl
REM: Porcentaje de pacientes contagiosos que ingresan en UAAAN (tantos por uno)
- (80) **TS Tasa de mortalidad=0.9**

Units: Dmnl
REM: Letalidad de la enfermedad sin asistencia sanitaria (tantos por uno)

(81) **TS Tasa de recuperacion=0.5**

Units: Dmnl
REM: Cte. Porcentaje de pacientes que superan la enfermedad (tantos por uno)

(82) **TS Tasa de salida cuarentena=42**

Units: Day
REM: Tempo de permanencia en aislamiento

(83) **TS Tasa de vacunación=0**

Units: Dmnl
REM: Cte. que determina el porcentaje de personas a las que se les administra la vacuna contra la enfermedad.

(84) **TSx casos importados= 1**

Units: personas

#6.- Resultados de las simulaciones

Se ejecuta con la siguiente calibración, con un horizonte temporal de 365 días y una población susceptible de 10.000 habitantes.

Tasas o parámetros constantes

(57) **TS Cuarentena=1**

(58) **TS Curación S1=0.4**

(59) **TS duración enfermedad=7**

(60) **TS EM S1=7**

(61) **TS EM S2=7**

(62) **TS EM S3=7**

(63) **TS horas laborales por persona=8**

(64) **TS Min personal necesario=40**

(65) **TS Periodo de incubación=10**

(66) **TS promedio atención diaria S1=0**

(67) **TS Promedio atención diaria S2=0**

(68) **TS Seguridad Cte A = -0.1**

(69) **TS Seguridad Cte B= 0,1**

(70) **TS Seguridad Cte C= 1**

(71) **TS Tasa de agravamiento=0.5**

(72) **TS Tasa de contacto= 10**

(73) **TS Tasa de contagio= 0.1**

(74) **TS Tasa de hospitalización=1**

(75) **TS Tasa de mortalidad=0.9**

(76) **TS Tasa de recuperación=0.5**

(77) **TS Tasa de salida cuarentena=42**

(78) **TS Tasa de vacunación=0**

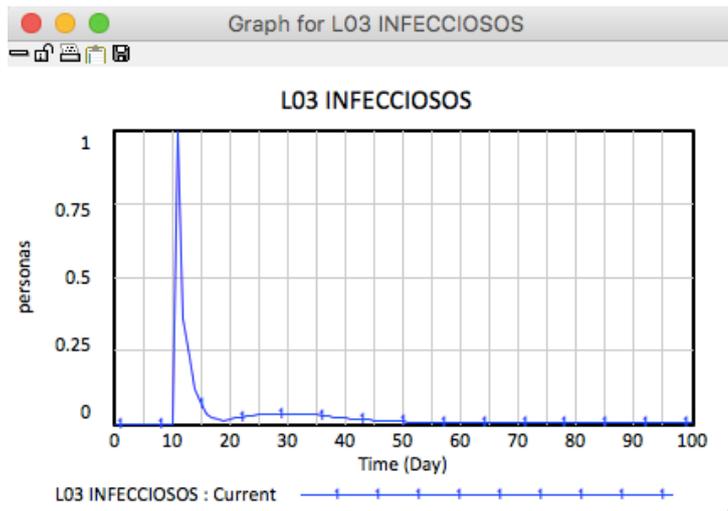
Las variables de nivel se comportan del siguiente modo:



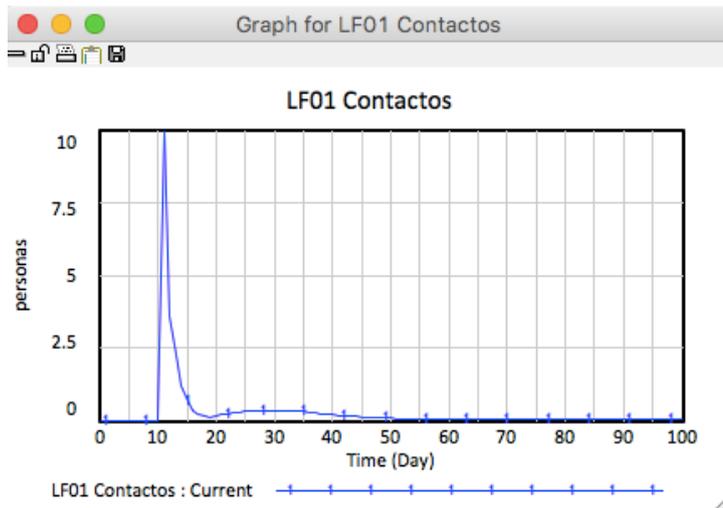
De

10.000 disminuyen a 9987 al los

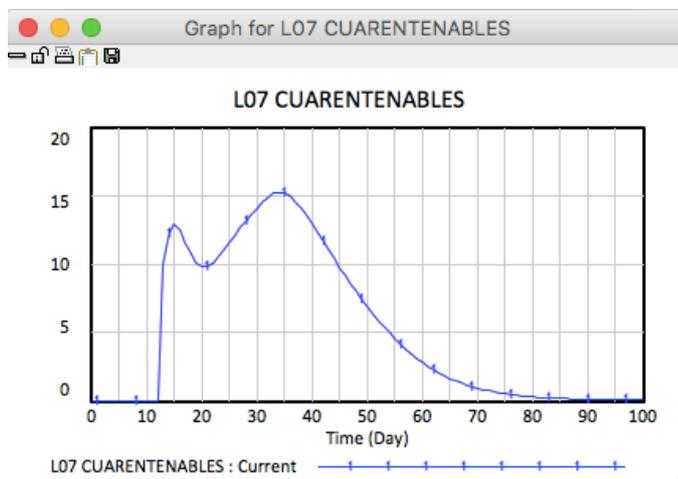
cien días de iniciada la epidemia.



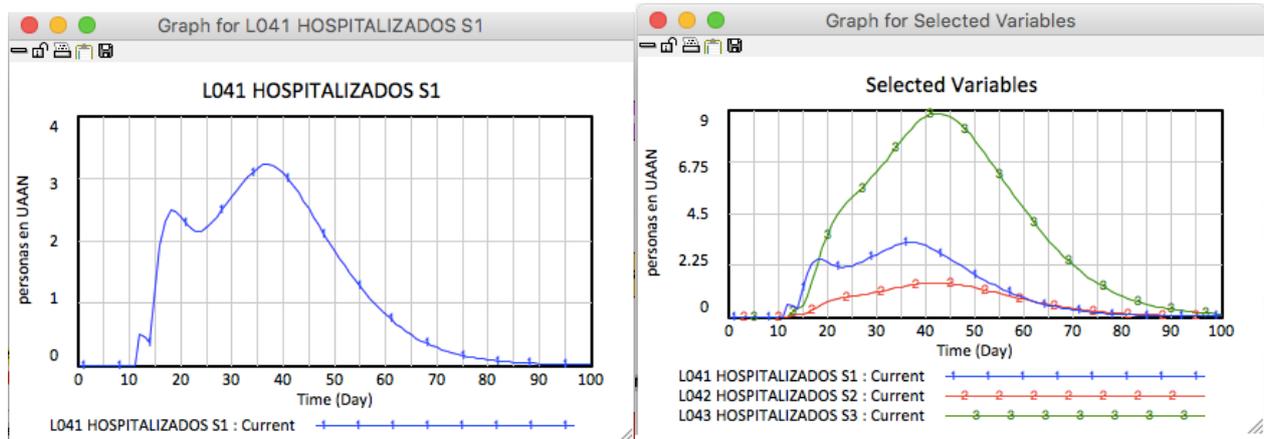
El caso cero se da en el décimo día de la simulación, y no se registra ningún caso más sin atención médica.



Se dan diez contactos en el día 11, tras la entrada en la comunidad del caso cero, y nunca más se vuelve a registrar nuevos contactos provocados por este caso. Estos contactos se aíslan inmediatamente como sospechosos, pasando a cuarentenables.



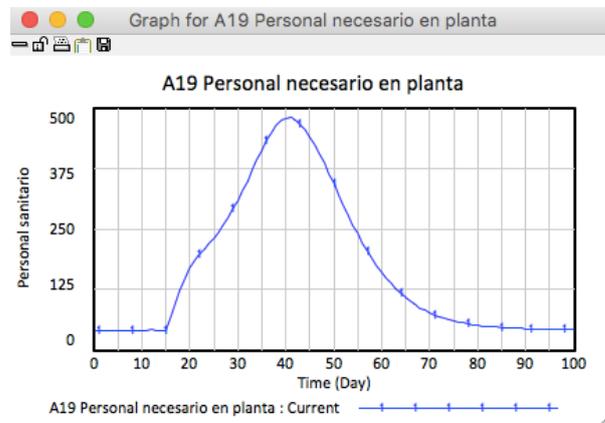
Debido al tiempo de cuarentena permanecen en esta situación hasta en día 32. Un caso contrae la enfermedad, el 10% según la tasa de contagio.



Este gráfico muestra los ingresados en las tres situaciones clínicas, basal, críticos y en recuperación.

En relación al personal, se ha tomado en cuenta los cálculos de horas necesarias por paciente realizados por ISDEFE, en relación a los metros cuadrados de las zonas comunes de la Planta 22, en torno a 600 m2 de zonas comunes.

El resultado es el siguiente.

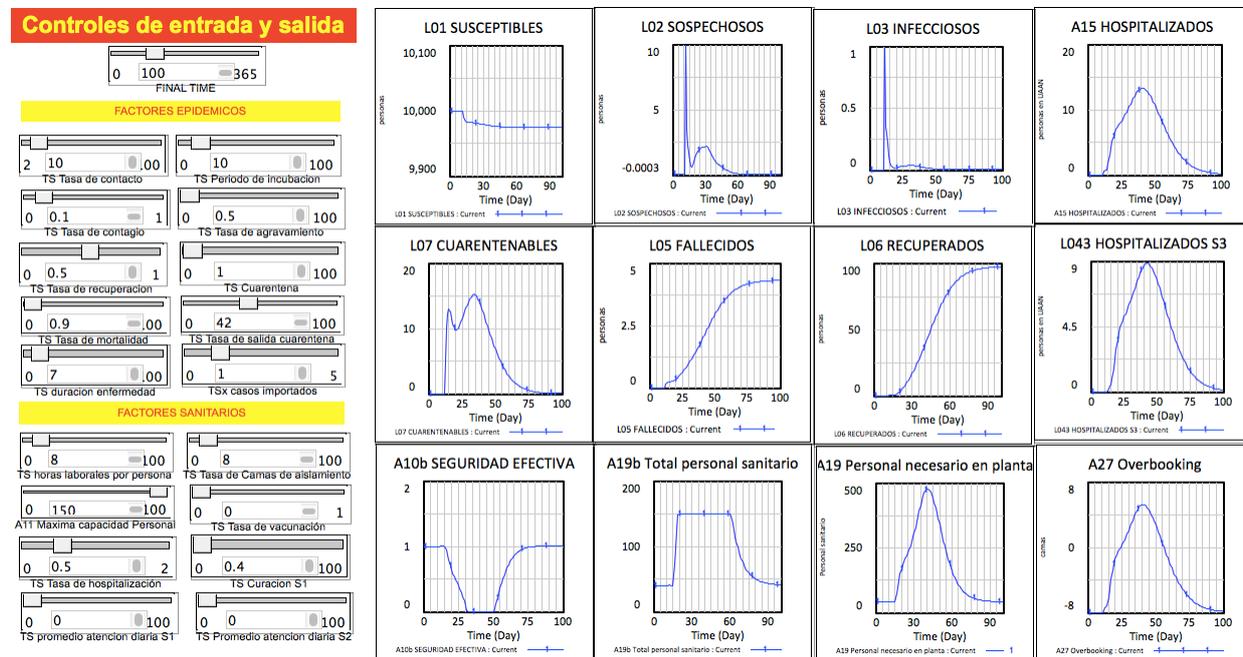


En esencia, con los parámetros utilizados, tan sólo se necesitaría un incremento relativo de personal para atender a los dos casos que ingresan entre los días 10 y 20 de la simulación.

El simulador utilizado, VensimPlus[®] permite poder ver de modo razonablemente panorámico varios escenarios, mediante el diseño de gráficos múltiples con posibilidad de regular diferentes parámetros para comprobar cómo se comporta el modelo sin tener que repetir las simulaciones modificando uno a uno cada parámetro.

El resultado conjunto es el del siguiente gráfico.

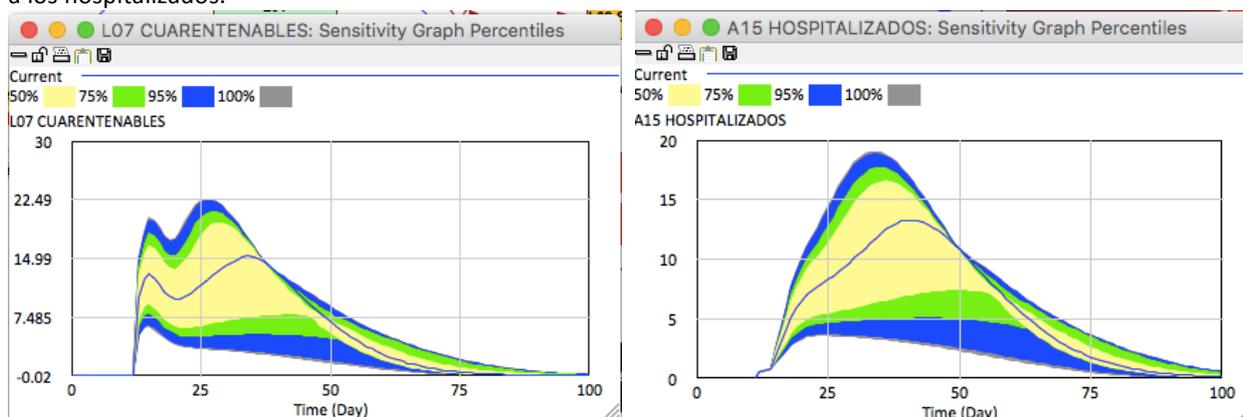
Escenario 1: Camas de aislamiento = 8



Este sería el escenario ideal en el que se procede al aislamiento de los sospechosos e ingreso inmediato de los infecciosos, que arrojan, con la contagiosidad determinada, tres infectados y treinta sospechosos, dos fallecidos, 18 recuperados, 22 cuarentenados y 9 hospitalizados. La Planta UAAN, alcanzaría un máximo de 10 camas ocupadas, pero la seguridad del personal caería de modo considerable, siendo el personal sanitario el realmente expuesto al contagio.

Por último, la posibilidad de efectuar un análisis estocástico del modelo, permite conocer la dispersión de la respuesta de las diferentes variables, en función de la variabilidad de las tasas y variables auxiliares que se desee.

En este caso, simulando la variabilidad de la tasa de contactos entre 8, y 12, el resultado es el siguiente en relación a los hospitalizados.



El gráfico representa 200 simulaciones con variabilidad entre 8 a 12 de tasa de contactos.

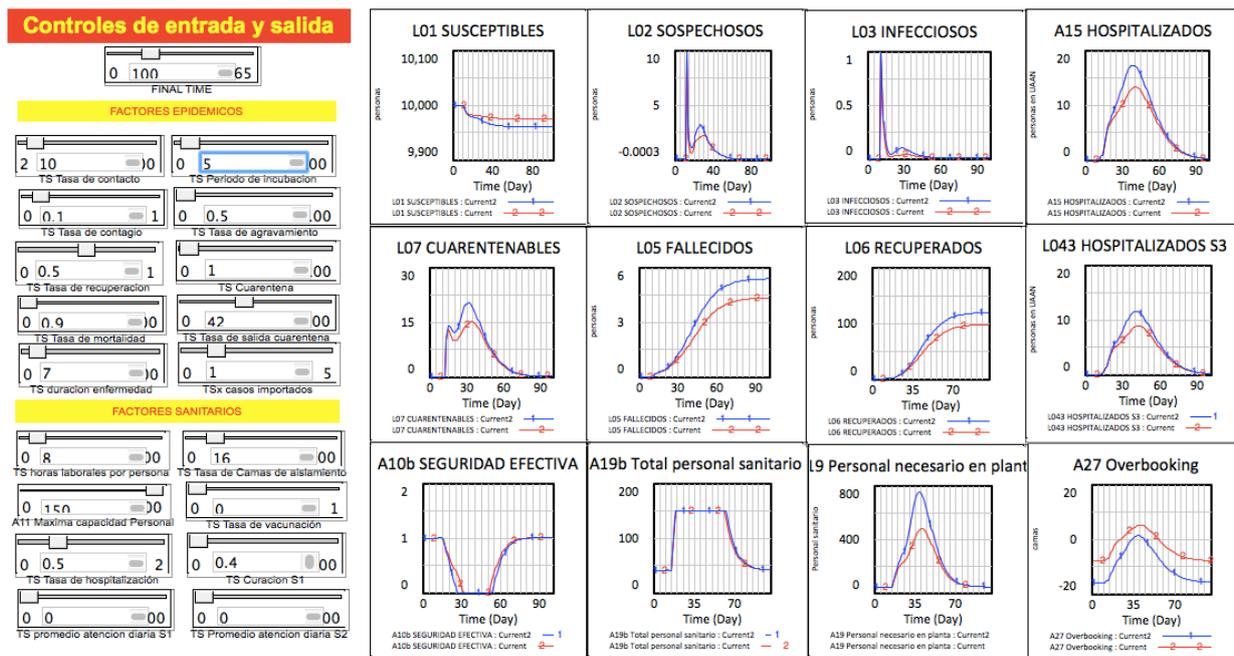
Las posibilidades de simulación variando las tasas y los escenarios iniciales son prácticamente ilimitadas.

Estos gráficos muestran probabilidades desde 50% a 100%.

Escenarios comparados: tasa de incubación 10 y 5 y en el segundo escenario las camas se aumentan a 16

Si se reduce la tasa de incubación a 5 días antes del rescate de los infectados en cuarentena, los resultado que muestra el modelo son los siguientes (simulación inicial “Current” en rojo y la segunda “Current2” en azul).

En estas circunstancias, el personal necesario en la fase crítica ascendería a 500 personas, la planta estaría saturada, tanto de enfermos como de personal, y los niveles de seguridad bajarían alarmantemente, por lo que el riesgo de contagio del personal sanitario crecería de una forma muy preocupante.



9. Discusión

Los modelos dinámicos, para que funcionen requieren que se cumplan dos condiciones esenciales, la primera, que la lógica de relaciones sea correcta, lo que viene dado por el diagrama de Forrester y el conjunto de ecuaciones en el que se basa el modelo.

La segunda condición es la calibración, lo que viene dado por las tasas (o valores constantes) y las variables auxiliares, que afectan directamente al comportamiento de los flujos y estos al de los niveles.

Tanto las tasas como las variables auxiliares necesitan basarse en algún supuesto que tenga sentido para los expertos, de lo contrario, el modelo, aun bien diseñado, al estar mal calibrado, arrojará resultados absurdos o no predecibles de modo empírico.

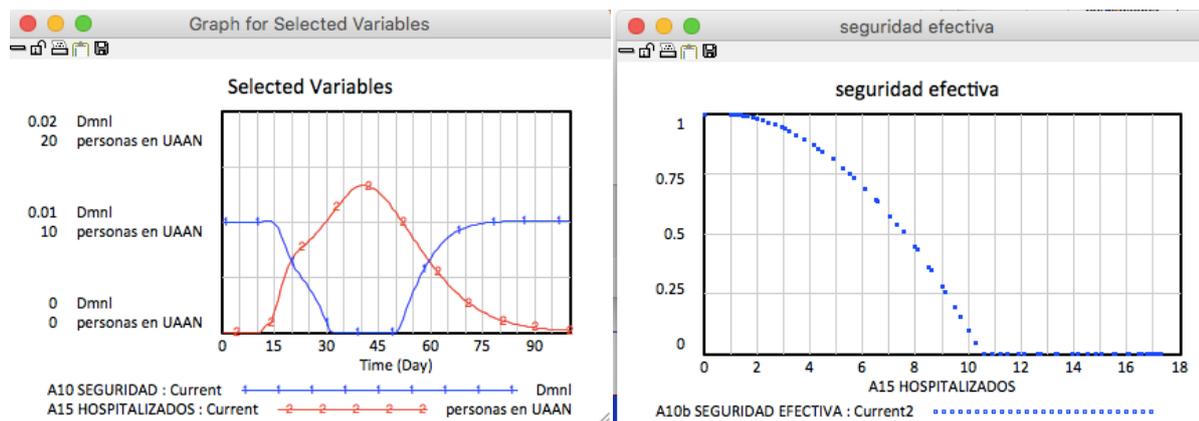
En el caso del modelo “Epidemias”, desarrollado, y su aplicación a la epidemia de Ébola actual, no se tienen series estadísticas en las que basar la calibración de determinadas tasas. Una de ella es el comportamiento del personal de la UAAN.

El objetivo de este modelo es predecir la capacidad funcional de la UAAN, pero no hay experiencia previa salvo la del Hospital Carlos III a propósito de tres casos, que a efectos prácticos se reduce al último registrado.

Un capítulo importante es, primero la capacidad de actuación de hasta cuanto personal es posible.

En esta versión del modelo, se ha supuesto que la seguridad está en función inversamente proporcional a la cantidad de enfermos a atender, pero no un modo no lineal. El supuesto incorpora una función parabólica del tipo $y = -0,01x^2 + 0,01x + 1$, que muestra la siguiente gráfica.

El supuesto que se asume es que la seguridad caerá en función del número de pacientes, dado que se incrementa el número de personal que ha de trabajar simultáneamente e inevitablemente es imposible respetar el cumplimiento estricto de todas las normas de seguridad.



Estos y otros muchos supuestos hay que reconsiderar para conseguir que el modelo tenga realmente utilidad.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abbey H. 1952. An examination of the Reed-Frost theory of epidemics. Hum. Biol. 3:201
- García Piñera A. Modelos de ecuaciones diferenciales para la propagación de enfermedades infecciosas. Univ. Cantabria. Tesis doctoral. 2014

Bibliografía sobre Dinámica de Sistemas

1. ARACIL J. Introducción a la Dinámica de Sistemas. Ed. Alianza editorial AU.Textos. Madrid 1992
2. BERTALANFFY L.W. (1) Perspectivas en la Teoría General de Sistemas. Alianza Editorial. Madrid 1982
3. BERTALANFFY L.W. (2) Teoría general de los sistemas. Ed. Fondo de cultura económica. Madrid 1976
4. BERTALANFFY L.W.(3) Tendencias en la Teoría General de Sistemas. Alianza Editorial Madrid 1981.
5. CHORAFAS D. N. Systems and Simulation. Academic Press. London 1965
6. CREUS A. Simulación y Control de Procesos por Ordenador Ed. Marcombo.Madrid 1987
7. DELGADO GUTIERREZ J.A (1). Análisis dinámico de organizaciones sanitarias. Trabajo de fin de curso del Máster de Administración y Dirección de Servicios Sanitarios (ICADE, Madrid. 1995
8. DELGADO GUTIERREZ J.A. (2) De la Riva Grandal J.M. Teoría de Sistemas y su aplicación a la Medicina. Medicina Militar 43:2;1987. 140-147
9. DELGADO GUTIERREZ J.A. (3) Vigilancia Epidemiológica Informatizada de la infección nosocomial y su aplicación a la Política de Antibióticos. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma. Madrid 1987
10. DELGADO GUTIERREZ J.A. (4) Dominguez Rojas V. Gil Miguel A. Damaso López D. Infecciones hospitalarias. Modelos dinámicos básicos. Rev.Esp.Microb.Clin. Vol4. 79-85,1989
11. FORRESTER J. (1) Industrial Dynamics. The MIT Press. Massachusets 1961
12. FORRESTER J. (2) Market Growth as influenced by Capital Investment. En Robert E. Managerial Applications of System Dynamics. Pag205-228. The MIT Press. Massachusets 1984
13. FORRESTER J. (3) Urban Dynamics. The MIT Press. Massachusets. 1969
14. FORRESTER J. (4) World Dynamics. Wright-Allen Press.Cambridge 1971
15. MEADOWS D. L. Los límites del Crecimiento. Fondo de Cultura Económica. Mexico 1972
16. MEADOWS H. et al. Más allá de los límites del Crecimiento. Ed. Aguilar. Madrid 1992

17. MESAROVIC M. PESTEL E. La humanidad en la encricijada. Fondo de Cultura Económica. Madrid 1974
18. OJEDA AVILES A. Análisis de costes de un centro hospitalar4io. Sevilla 1992
19. SENGE P. La quinta disciplina. Editorial Granica, Barcelona 1999
20. SHANNON R. System Simulation. Prentice Hall Inc. New Jersey 1975
21. SINGH J. Teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética. Alianza Editorial. AU29. Madrid 1979.
22. TAMAMES R. Ecología y Desarrollo. Alianza Editorial. Madrid 1978

*