

Modelado de restauración forestal en sistemas de Dehesa sometidos a herbivoría

Jorge G. Casanovas ^{*}, I de Aranzabal [†] y J. Canchado

Resumen

Los sistemas forestales de dehesa, presentan en la actualidad un serio problema de regeneración. Por este motivo es necesario diseñar estrategias que faciliten el reclutamiento de plantas jóvenes. En este trabajo desarrollamos un modelo teórico de un sistema con alta presión de herbivoría en el que se simula el efecto de dos medidas de manejo: la repoblación con planta o semilla y la protección de plantones. Se concluye que, según el modelo, resulta más rentable la protección de plantones que la repoblación, pero dado que ambas medidas no son excluyentes en restauración forestal se recomienda una estrategia mixta, siendo la protección de los plantones repoblados muy importante en sistemas con alta presión de herbivoría.

Palabras clave: restauración, sistemas, herbivoría.

Abstract

“Dehesa” forest systems currently present a serious problem of regeneration. Therefore it is necessary to design strategies for the recruitment of young plants. In this paper we develop a theoretical model of a system with a high pressure of herbivory and simulate the effect of two measures of forestry management: repopulation with plant or seed and the protection of young trees. It is concluded that, according to the model, the protection of young trees is more rentable than the repopulation. Given that both measures are not mutually exclusive, we recommend a mixed strategy, the protection of repopulated young trees being very important in “Dehesa” systems with high herbivorous pressure.

Keywords: restauration, systems, herbivory

* 1. Bienesma-Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
Universidad Politécnica de Madrid, Spain. jgonzalez@bienesma.com

† 2. Depto. Ecología. Facultad de Biología. Universidad Complutense de Madrid

Introducción

Las dehesas son sistemas agrosilvopastorales, cuyo uso múltiple- forestal agrícola y ganadero- condiciona su estructura y funcionamiento de un modo claramente peculiar. Este hecho plantea un problema acuciante en la actualidad que es el de la regeneración de estos sistemas savanoides antropogénicos (San Miguel 1993 y Pulido et al. 2010). Por este motivo es especialmente importante intervenir en estos sistemas si se quiere favorecer un incremento en la cobertura arbórea, o simplemente permitir la sostenibilidad de la propia dehesa, ya que en la situación actual estos sistemas carecen suficiente reclutamiento de plántulas.

El objetivo de este trabajo es ensayar teóricamente, y por tanto sin apenas coste económico, las posibilidades que ofrecen a largo plazo dos medidas diferentes de restauración de la población vegetal (repoblación y protección de plantones), excluyendo en principio el control directo de las poblaciones de herbívoros o el uso de vallados.

Material y métodos

El modelo ha sido construido usando el lenguaje de dinámica de sistemas Stella II (High Performance Systems, Inc. 1994a y 1994b). Este lenguaje de alto nivel permite generar algoritmos numéricos sin las limitaciones propias de los modelos matemáticos analíticos, nosotros aplicamos el algoritmo de Runge-Kutta de orden 4 (Faires y Burden 2004). Este modelo está construido en el lenguaje conceptual de Forrester (1961) y en la teoría general de sistemas (Von Bertalanffy 1969).

Modelo

La estructura que hemos dado al modelo creemos que es la más simple que nos permitía abordar el problema, es decir, hemos priorizado la simplicidad sacrificando algo de realismo. Pero creemos que se trata de un modelo sencillo, que destaca los aspectos fundamentales del proceso, despreciando aquellos detalles, que sin ser cualitativamente relevantes nos hubieran permitido ajustar más el modelo a la realidad. También nos parece

importante destacar el carácter eminentemente teórico de nuestro modelo, ya que no hemos incluido en él aspectos empíricos, esto unido a su simplicidad lo hace ampliamente generalizable a sistemas forestales con una alta presión de herbivoría.

El sistema es modular teniendo en cuenta variables bióticas, de silvicultura y económicas.

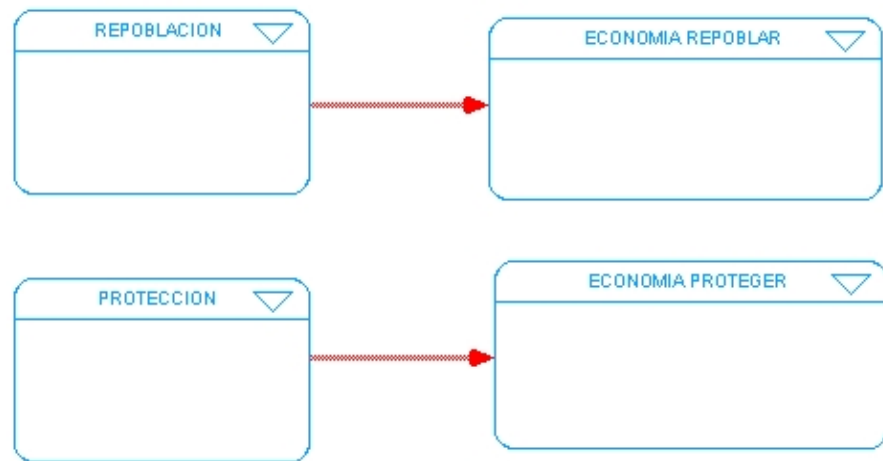


Figura 1: Estructura modular del sistema.

En consonancia con los rasgos anteriores que definen el modelo presentado, está también su carácter determinístico. Consideramos que incluir en un modelo tan teórico como este, elementos de estocasticidad no sólo no tendría sentido, sino que dificultaría muchísimo la interpretación de los resultados de las simulaciones. Concluimos por tanto que nuestro modelo es teórico, simple y determinista, aunque no lineal. Este tipo de modelos con todas sus limitaciones presenta una utilidad muy grande que se basa en los siguientes argumentos (Hannon y Ruth, 1997 y Ford, 2000):

- Permiten visualizar de un modo esquemático sistemas complejos
- Formalizan un contexto teórico para un número relativamente grande de hipótesis, cuya contrastación se puede hacer en fases posteriores del estudio. Esta estrategia representa un complemento al método

tradicional de contrastar hipótesis generadas en un marco teórico no formal.

- Constituyen una buena interfase entre un modelo realmente predictivo y realista y el modelo conceptual del que se parte con los conocimientos previos no formales.

Respecto a la estructura propiamente dicha se ha construido asumiendo una tasa de crecimiento neto de la población linealmente decreciente. De esta manera el modelo es análogo al logístico (Begon et al. 1988):

$$\frac{dN}{dt} = r(N) * N \quad (1)$$

siendo $r(N)=a-b*N$

Pero en lugar de implementar un único flujo bidireccional, hemos separado el flujo neto en dos flujos unidireccionales de natalidad y mortalidad tal que:

$$\frac{dnat}{dt} = n(N) * N \quad (2)$$

siendo $n(N)$ linealmente decreciente.

$$\frac{dmort}{dt} = m(N) * N \quad (3)$$

siendo $m(N)$ linealmente creciente.

De esta manera siempre se cumple que:

$$n(N)-m(N)=a-b*N \quad (4)$$

y por tanto el modelo es análogo al logístico.

Se puede demostrar que el valor de CAPACIDAD DE CARGA está implícito en el modelo descompuesto y que depende de los parámetros de las rectas de natalidad y mortalidad.

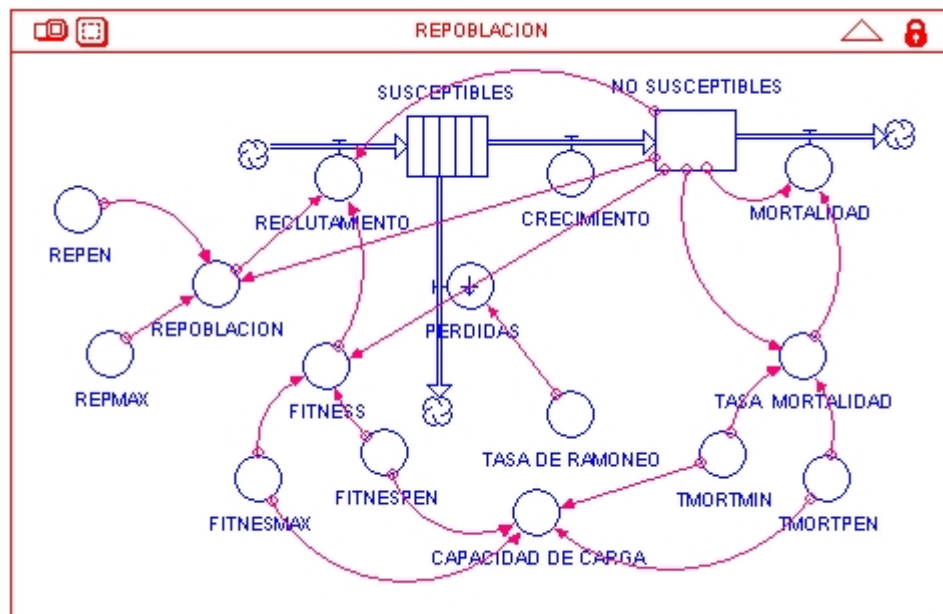


Figura 2: Módulo del sistema de repoblación

En nuestro modelo tenemos un elemento *conveyor* (High Performance Systems, Inc. 1994b) intercalado entre el flujo de natalidad y el de mortalidad, pero esto no altera el funcionamiento logístico respecto a que la población alcance la capacidad de carga del medio. Sin embargo el perfil sigmoideo típico de la logística si se altera dependiendo del parámetro del análisis numérico *time transit*, observándose un ascenso escalonado de la población a la capacidad de carga. Estos escalones se deben al retraso temporal entre la natalidad y la entrada al compartimento de no-susceptibles. Una vez que la población llega a la capacidad de carga se producen oscilaciones, en algunos casos amortiguadas, hasta que finalmente la población converge.

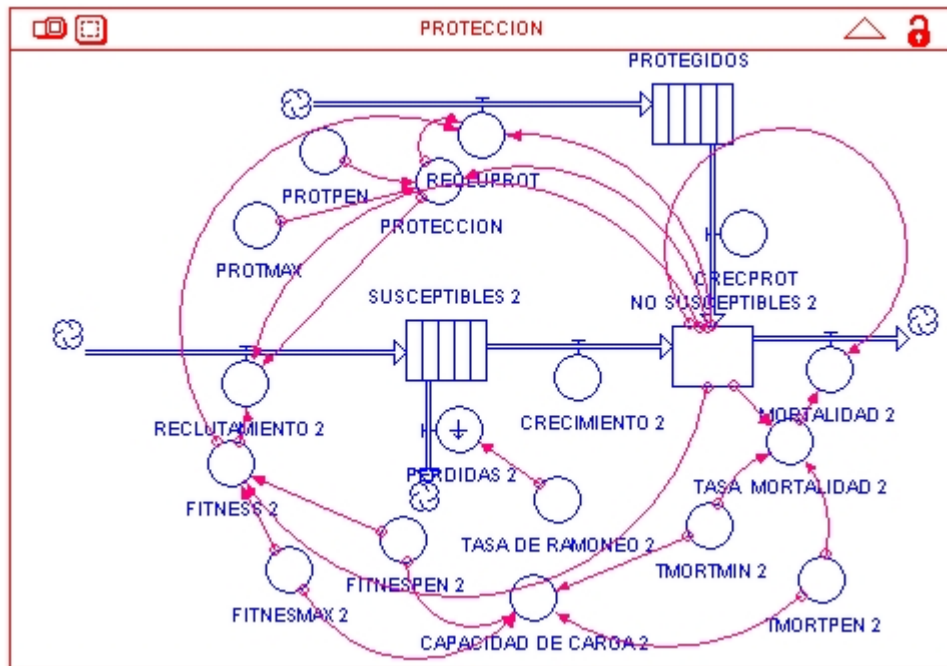


Figura 3: Módulo del sistema de protección.

Componentes del sistema

Sólo aparecen dos elementos básicos en el sistema, cuyas unidades son pies/Ha, la población de individuos susceptibles (SUSCEPTIBLES y SUSCEPTIBLES 2), que incluye todas las plantas cuya altura del tronco permite a los herbívoros ramonear las copas, o la planta entera, y por tanto limitar severamente su producción de frutos (componente FITNESS que es la contribución con descendientes a la siguiente unidad temporal) y su viabilidad. Por otra parte tenemos el compartimento NO SUSCEPTIBLES, que tiene su entrada en aquellos individuos que se libran de la mortalidad por ramoneo y llegan a la altura que los hace no accesibles a los herbívoros por ramoneo, según TASA DE RAMONEO, generándose por tanto PERDIDAS.

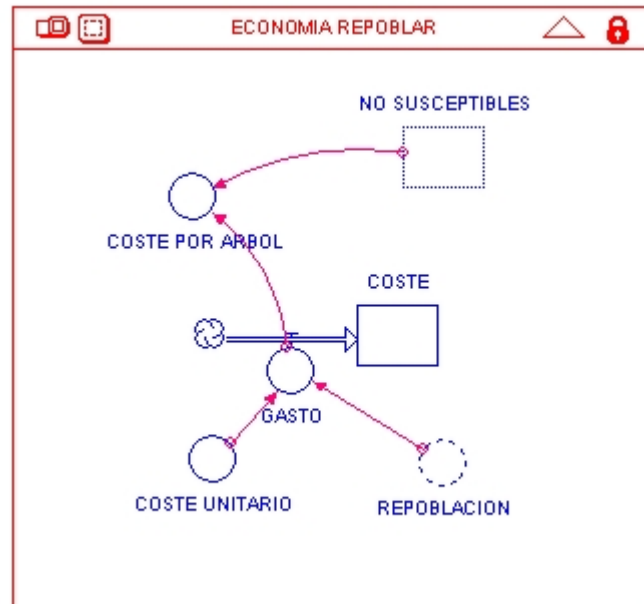


Figura 4: Módulo del sistema de economía de la repoblación.

Respecto a este punto hay que considerar que el tiempo que tardan los individuos susceptibles en pasar al compartimento de no-susceptibles se considera en el modelo que es fijo (parámetro *time transit*). Este tiempo debe considerarse promedio, ya que no todos los individuos alcanzarán la altura crítica al mismo tiempo, estas diferencias probablemente se acentuarán con el ramoneo. Sin embargo hacer el tiempo de tránsito variable no tendría sentido, ya que esas diferencias en el tiempo serán interindividuales, pero no intergeneracionales. La *fitness* es la contribución en descendientes a la siguiente generación, (FITNESS) se considera que no hay diferencias entre individuos siendo por tanto un valor promedio.

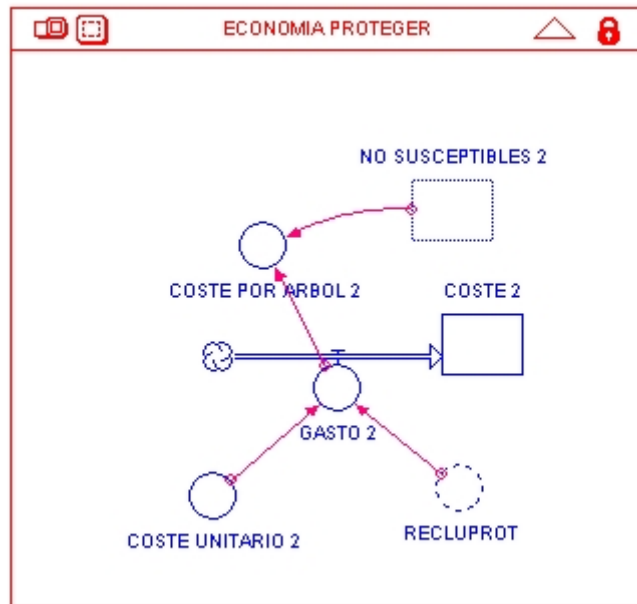


Figura 5: Módulo del sistema de economía de la protección

Medidas de manejo

La variable PROTECCION es la fracción del reclutamiento que es protegida mediante algún dispositivo que limita totalmente el acceso a los herbívoros. Varía por tanto de 0 a 1 y es una función linealmente decreciente de la población de no susceptibles, ya que asumimos que a medida que se va consiguiendo una densidad de arbolado mayor, también debe ser menor la fracción de nuevo reclutamiento que se protege. La pendiente de esta recta (PROTPEN) teniendo un punto de corte (PROTMAX). Esta función nos indica la velocidad a la que se reduce la protección, y la población de no susceptibles muestra mucha sensibilidad a la variación de este parámetro.

La variable REPOBLACION es una medida de manejo que consiste en añadir una cantidad adicional al reclutamiento, que también depende inversamente de la densidad, siendo una función lineal dependiente de REPEN y REPMAX (pendiente y punto de corte respectivamente).

Escenario

Nuestro estudio del modelo se ha basado en el análisis de la sensibilidad a los parámetros que reflejan la posible intervención de los gestores en un

sistema real, es decir, los parámetros de protección y repoblación. Pero para hacer este análisis mantenemos fijos el resto de los parámetros en unos valores teóricos que hemos intentado que fueran realistas. Así pues asumimos que la tasa de ramoneo es tan alta (0.95) que impide la regeneración del bosque. De esta manera el valor de la población no-susceptible está estabilizado en unos 20 pies/Ha.

Resultados

Los resultados de los análisis de sensibilidad se muestran en las gráficas. Los parámetros que se han hecho variar son principalmente los puntos de corte de las rectas de repoblación (REPMAX) y protección (PROTMAX), ya que reflejan los valores máximos de intervención en el momento inicial en el que la densidad del arbolado es mínima y la población de no-susceptibles muestra gran sensibilidad a su variación. Las variables respuesta han sido la densidad de NO-SUSCEPTIBLES (1 y 2), ya que determina la cobertura arbórea final y las variables económicas COSTE y COSTE_POR_ARBOL.

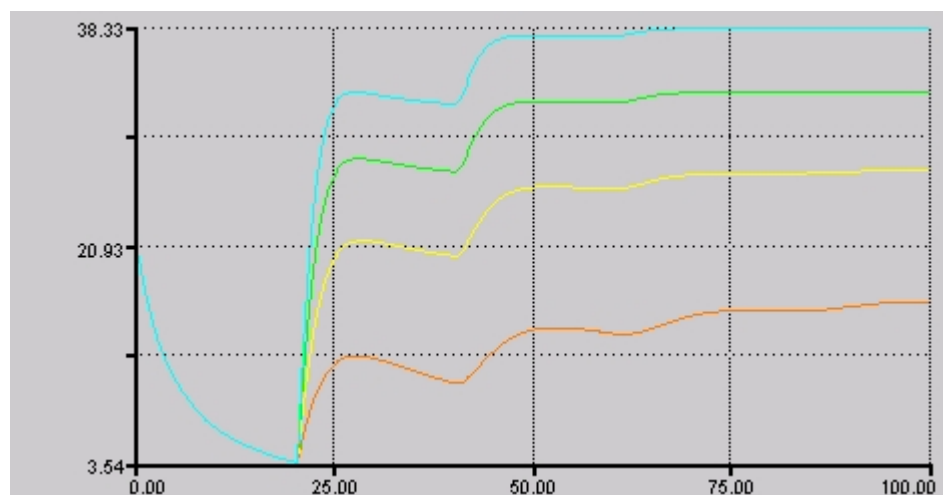


Figura 6: Evolución temporal de la variable No Susceptibles del sistema de repoblación. Cada gráfica corresponde a un valor del parámetro REPMAX (5, 70, 135 y 200)

Se puede concluir que la mayor densidad de arbolado se consigue con la protección, ya que se alcanzan poblaciones muy próximas a la capacidad de

carga del medio. Esto es debido a que se hace al sistema en gran medida independiente de los herbívoros, y por tanto se le permite acercarse mucho a la capacidad de carga sin herbívoros.

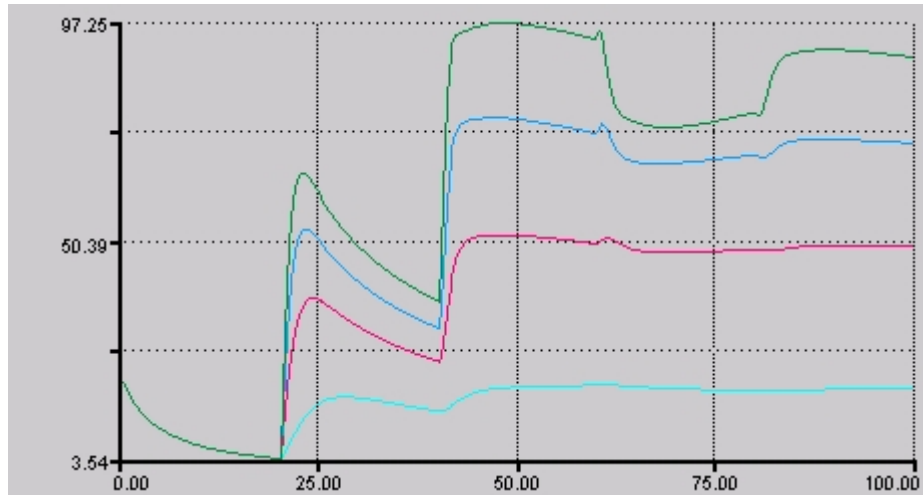


Figura 7: Evolución temporal de la variable No susceptibles 2 del sistema de protección. Cada gráfica corresponde a un valor del parámetro PROTMAX (0.1, 0.4, 0.7 y 1)

También se obtiene esta mayor densidad de no susceptibles a un coste menor, ya que tanto el coste total acumulativo como el coste por árbol son menores en el caso de la protección.

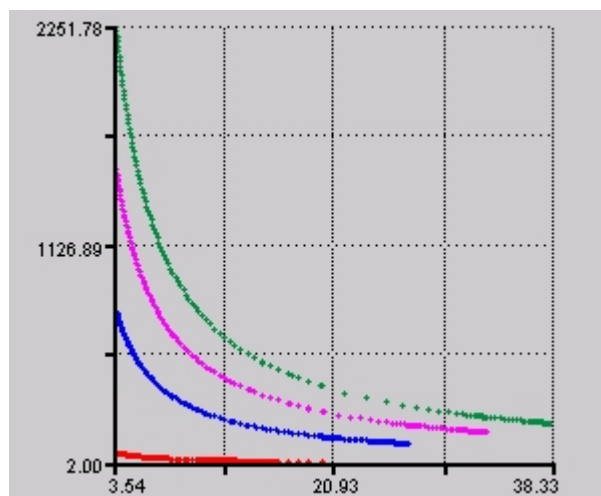


Figura 8: Retrato de fases de la variable X: No susceptibles versus Y: Coste por árbol del sistema economía repoblación. Cada gráfica corresponde a un valor del parámetro REPMAX (5, 70, 135 y 200)

Según el modelo si se quiere tener una población estable baja resulta más rentable comenzar con un esfuerzo de protección también bajo y reducirlo paulatinamente, ya que si se comienza con una gran protección el coste por árbol será muy alto. Sin embargo si se quieren conseguir altas densidades la única manera será partiendo de grandes esfuerzos de protección. En cambio para la repoblación los costes por árbol no decrecen linealmente sino exponencialmente, pero son siempre mayores que los de protección aun consiguiéndose densidades menores.

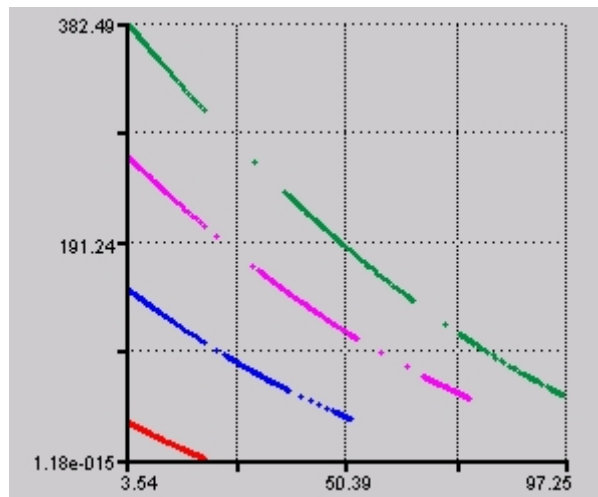


Figura 9: Retrato de fases de la variable X: No susceptibles 2 versus Y: Coste por árbol del sistema economía protección. Cada gráfica corresponde a un valor del parámetro PROTMAX (0'1, 0'4, 0'7 y 1)

Nuestro modelo nos permite por tanto tomar decisiones de tipo económico, teniendo en cuenta no sólo la densidad final que se consigue, sino también el coste de cada medida de manejo. Sin embargo estas dependen críticamente de los datos del coste de mercado real de cada actividad forestal.

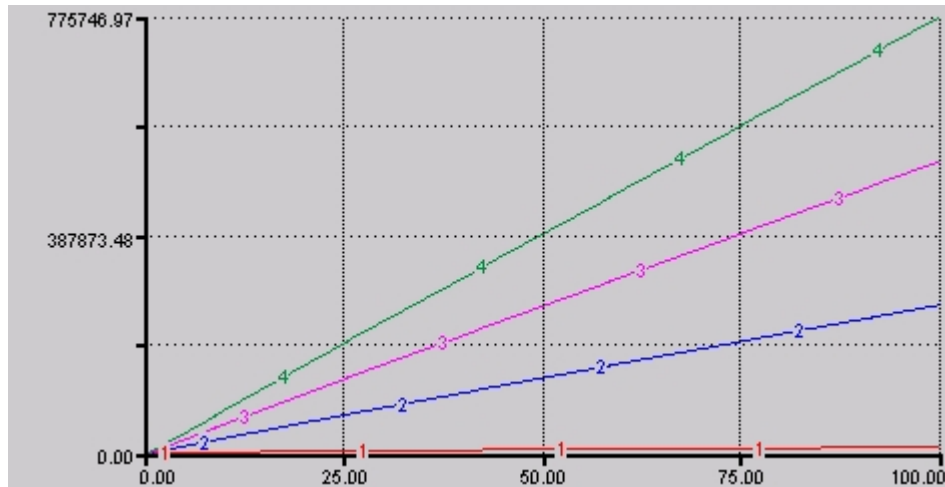


Figura 10: Evolución temporal del coste total del sistema repoblación. Cada gráfica corresponde a un valor del parámetro REPMAX (5, 70, 135 y 200)

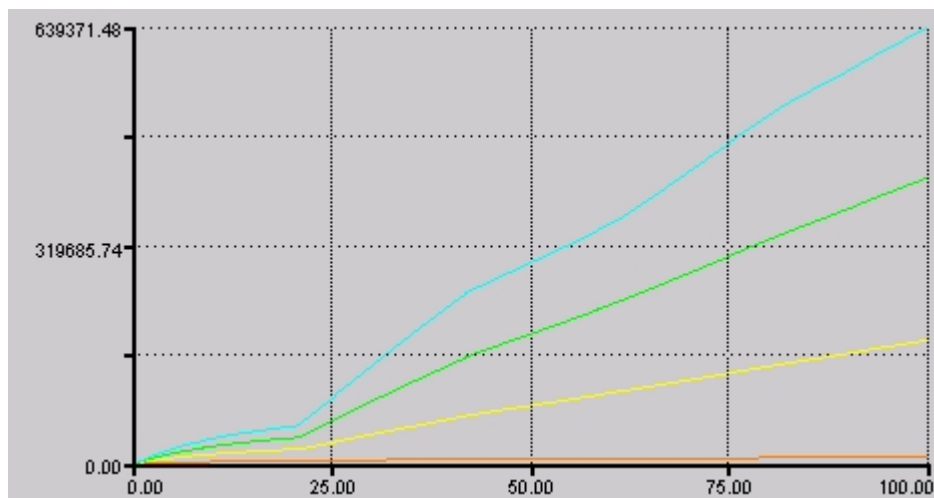


Figura 11: Evolución temporal del coste total del sistema protección. Cada gráfica corresponde a un valor del parámetro PROTMAX (0'1, 0'4, 0'7 y 1)

Discusión y conclusiones

Un modelo como el nuestro no sería muy difícil de alimentar con datos empíricos, ya que los costes de cada unidad de obra (repoblación y protección) podrían conocerse fácilmente y las poblaciones iniciales podrían obtenerse de los inventarios forestales. Sería más complicado estimar los parámetros de la *fitness* y de la mortalidad, pero el hecho de que fueran exactos tampoco influiría demasiado en los resultados cualitativos.

El sistema que presentamos es una simplificación de la realidad, y la separación de los procesos de manejo en protección y repoblación es deliberadamente artificial, ya que normalmente se hacen ambas cosas en una repoblación forestal. Sin embargo este ejercicio teórico nos sirve para mostrar la metodología de la Dinámica de sistemas en Ecología y para destacar la importancia de la protección contra herbívoros en sistemas de repoblación forestal en el que se den altos niveles de herbivoría. Nuestra conclusión es, por tanto, que la mejor estrategia de restauración forestal debería ser mixta, y minimizar los efectos de la herbivoría mediante el uso de protectores (siempre que sea posible).

Agradecimientos

Tenemos que agradecer a Francisco J. Acosta y a Francisco López del Departamento de Ecología de la Universidad Complutense de Madrid la revisión del trabajo.

Referencias

- Begon, M. J. L. Harper y C.R. Townsend 1988. Ecología: individuos poblaciones y comunidades. Omega Barcelona.
- Faires, J.D. y Burden, R. Métodos numéricos. Thomson Editores Spain. Madrid
- Ford, E.D. 2000. Scientific method for ecological research. Cambridge University Press. Cambridge.
- Forrester J. W. 1961. Industrial Dynamics. Cambridge, Mass, US. The MIT Press
- Hannon, B. y Ruth, M. 1997. Modelling dynamic biological systems. Springer-Verlag. New York.
- High Performance Systems, Inc. 1994a. An Introduction to System Thinking. Hanover. New Hampshire, US. HPS.
- High Performance Systems, Inc. 1994b. STELLA II: Technical documentation. Hanover New Hampshire, US. HPS.

Pulido F., García E., Obrador J.J. y Moreno G. 2010. Multiple pathways for tree regeneration in anthropogenic savannas: incorporating biotic and abiotic drivers into management schemes. *Journal of Applied Ecology* 47(6): 1272-1281.

San Miguel A. 1993. Silvopascicultura mediterránea. En: Orozco y López. *Selvicultura Mediterránea*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. Cuenca.

Von Bertalanffy, L. 1969. *General Systems Theory: foundations, development and applications*. George Braziller, New York.

Apendice: las ecuaciones del modelo

ECONOMIA PROTEGER

- $COSTE_2(t) = COSTE_2(t - dt) + (GASTO_2) * dt$
INIT $COSTE_2 = 0$
INFLOWS:
 - ⚙ $GASTO_2 = COSTE_UNITARIO_2 * RECLUPROT$
- $COSTE_POR_ARBOL_2 = GASTO_2 / NO_SUSCEPTIBLES_2$
- $COSTE_UNITARIO_2 = 100$

ECONOMIA REPOBLAR

- $COSTE(t) = COSTE(t - dt) + (GASTO) * dt$
INIT $COSTE = 0$
INFLOWS:
 - ⚙ $GASTO = COSTE_UNITARIO * REPOBLACION$
- $COSTE_POR_ARBOL = GASTO / NO_SUSCEPTIBLES$
- $COSTE_UNITARIO = 40$

PROTECCION

- $NO_SUSCEPTIBLES_2(t) = NO_SUSCEPTIBLES_2(t - dt) + (CRECIMIENTO_2 + CRECPROT - MORTALIDAD_2) * dt$
INIT $NO_SUSCEPTIBLES_2 = 20$
INFLOWS:
 - ⚙ $CRECIMIENTO_2 = CONVEYOR_OUTFLOW$
 - ⚙ $CRECPROT = CONVEYOR_OUTFLOW$
- OUTFLOWS:
 - ⚙ $MORTALIDAD_2 = NO_SUSCEPTIBLES_2 * TASA_MORTALIDAD_2$
- ▣ $PROTEGIDOS(t) = PROTEGIDOS(t - dt) + (RECLUPROT - CRECPROT) * dt$
INIT $PROTEGIDOS = 0$
TRANSIT TIME = 20
INFLOW LIMIT = INF
CAPACITY = INF
INFLOWS:
 - ⚙ $RECLUPROT = FITNESS_2 * NO_SUSCEPTIBLES_2 * PROTECCION$
- OUTFLOWS:
 - ⚙ $CRECPROT = CONVEYOR_OUTFLOW$
- ▣ $SUSCEPTIBLES_2(t) = SUSCEPTIBLES_2(t - dt) + (RECLUTAMIENTO_2 - CRECIMIENTO_2 - PERDIDAS_2) * dt$
INIT $SUSCEPTIBLES_2 = 0$
TRANSIT TIME = 20
INFLOW LIMIT = INF
CAPACITY = INF
INFLOWS:
 - ⚙ $RECLUTAMIENTO_2 = (NO_SUSCEPTIBLES_2 * FITNESS_2) * (1 - PROTECCION)$
- OUTFLOWS:

OUTFLOWS:

 CRECIMIENTO_2 = CONVEYOR OUTFLOW

 PERDIDAS_2 = LEAKAGE OUTFLOW

LEAKAGE FRACTION = TASA_DE_RAMONEO_2

NO-LEAK ZONE = 0

☐ CAPACIDAD_DE_CARGA_2 = (FITNESMAX_2-TMORTMIN_2)/(FITNESPEN_2+TMORTPEN_2)

☐ FITNESMAX_2 = 4

☐ FITNESPEN_2 = 0.03

☐ FITNESS_2 = FITNESMAX_2-FITNESPEN_2*NO_SUSCEPTIBLES_2

☐ PROTECCION = PROTMAX-PROTPEN*NO_SUSCEPTIBLES_2

☐ PROTMAX = 1

☐ PROTPEN = 0.005

☐ TASA_DE_RAMONEO_2 = 0.95

☐ TASA_MORTALIDAD_2 = TMORTMIN_2+TMORTPEN_2*NO_SUSCEPTIBLES_2

☐ TMORTMIN_2 = 0.01

☐ TMORTPEN_2 = 0.01

REPOBLACION

☐ NO_SUSCEPTIBLES(t) = NO_SUSCEPTIBLES(t - dt) + (CRECIMIENTO - MORTALIDAD) * dt

INIT NO_SUSCEPTIBLES = 20

INFLOWS:

INFLOWS:

 CRECIMIENTO = CONVEYOR OUTFLOW

OUTFLOWS:

 MORTALIDAD = NO_SUSCEPTIBLES*TASA_MORTALIDAD

☒ SUSCEPTIBLES(t) = SUSCEPTIBLES(t - dt) + (RECLUTAMIENTO - CRECIMIENTO - PERDIDAS) * dt

INIT SUSCEPTIBLES = 0

TRANSIT TIME = 20

INFLOW LIMIT = INF

CAPACITY = INF

INFLOWS:

 RECLUTAMIENTO = (NO_SUSCEPTIBLES*FITNESS)+REPOBLACION

OUTFLOWS:

 CRECIMIENTO = CONVEYOR OUTFLOW

 PERDIDAS = LEAKAGE OUTFLOW

LEAKAGE FRACTION = TASA_DE_RAMONEO

NO-LEAK ZONE = 0

☐ CAPACIDAD_DE_CARGA = (FITNESMAX-TMORTMIN)/(FITNESPEN+TMORTPEN)

☐ FITNESMAX = 4

☐ FITNESPEN = 0.03

☐ FITNESS = FITNESMAX-FITNESPEN*NO_SUSCEPTIBLES

☐ REPEN = 0.2

☐ FITNESS = FITNESMAX-FITNESPEN*NO_SUSCEPTIBLES

☐ REPEN = 0.2

☐ REPMAX = 200

☐ REPOBLACION = REPMAX-REPEN*NO_SUSCEPTIBLES

☐ TASA_DE_RAMONEO = 0.95

☐ TASA_MORTALIDAD = TMORTMIN+TMORTPEN*NO_SUSCEPTIBLES

☐ TMORTMIN = 0.01

☐ TMORTPEN = 0.01