

MODELOS DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS

Generalidades de Vensim

Aprendizaje básico de **Vensim PLE**, un programa visual de modelización, análisis y simulación de sistemas dinámicos. Vensim funciona bajo Windows, y la versión PLE es de uso libre (disponible en <http://www.vensim.com>). Contiene un conjunto de herramientas visuales de fácil aprendizaje y manejo, con las que podemos construir modelos de simulación a partir de diagramas causales o de diagramas de flujo. También incluye una biblioteca de modelos listos para usar.

Ventana de trabajo

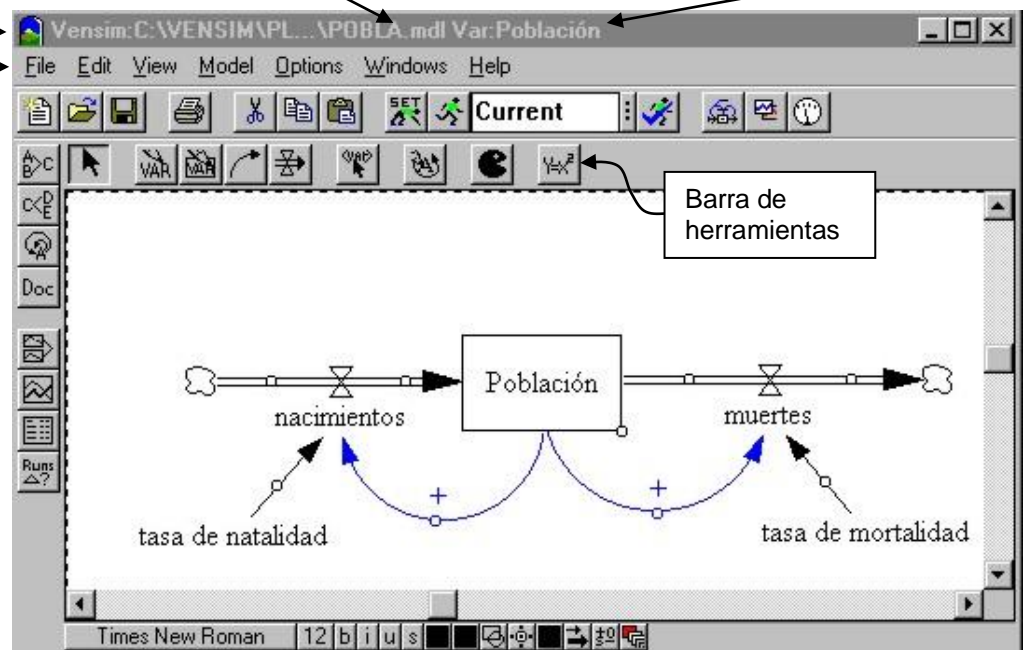
A continuación, se reproduce la pantalla típica del programa

Barra de título: indica el modelo en uso (POBLA.mdl) y de la variable seleccionada (POBLACIÓN)

Barra de menú

Herramientas analíticas

Barra de herramientas



Barra de menú

File **Edit** **View** **Model** **Options** **Windows** **Help**

Haciendo clic con botón izqdo. del ratón sobre cada una de las opciones desplegamos las respectivas persianas de menús específicos.

Las opciones de **File** (fichero) permiten abrir un modelo existente (Open Model), guardar en disco (Save), imprimir (Print), etc.

Las opciones de **Edit** (edición) permiten copiar y pegar partes seleccionadas de un modelo.

El menú **View** (vista) tiene opciones para manipular el esquema del modelo.

El menú de **Model** (modelo) da acceso al control de la simulación y al de los límites de tiempo.

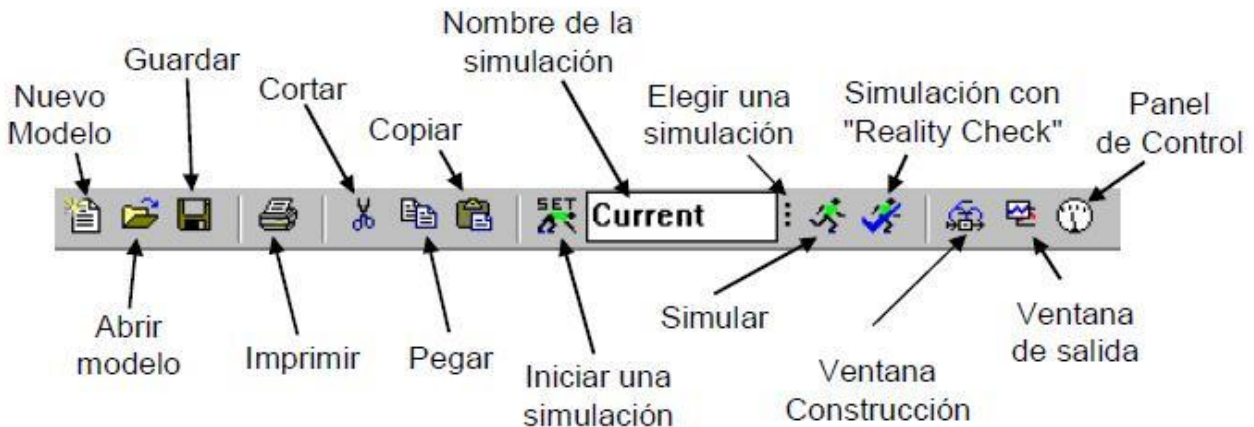
También a herramientas de chequeo y otras de importación y exportación de ficheros.

El menú de **Options** (opciones) permite modificar las opciones globales.

El menú de **Windows** permite cambiar de la ventana activa a otras ventanas abiertas.

El menú de **Help** permite acceder a la ayuda en línea y al manual electrónico.

Barra de herramientas principal

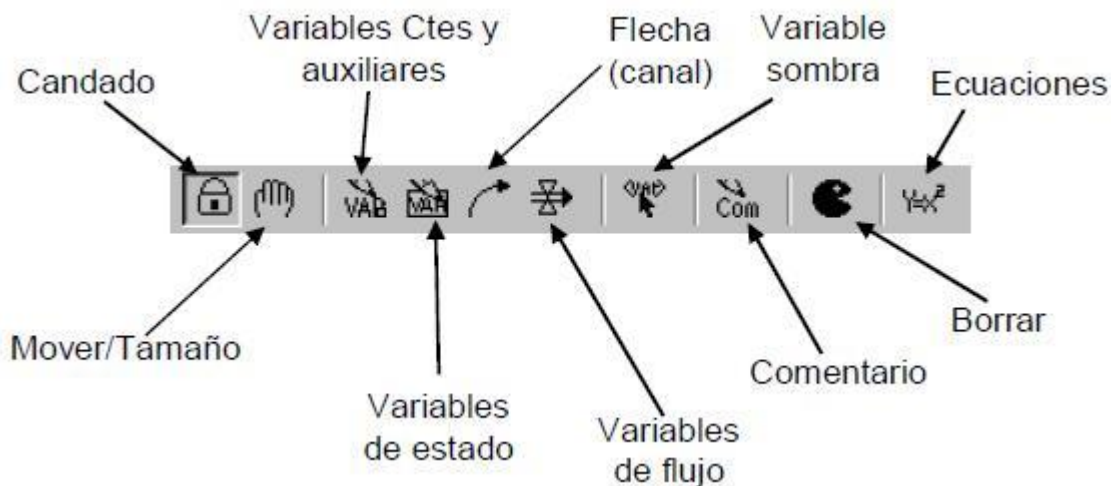


Además de las herramientas típicas que aparecen en cualquier programa, en Vensim tenemos estas otras:

- **Iniciar una simulación:** permite seleccionar el método de integración que se desea utilizar para realizar la simulación (Euler o Runge-Kutta).
- **Nombre de la simulación:** a cada simulación que se realice con un modelo se le puede dar un nombre distinto. De esta forma, se pueden tener tantas bases de datos distintas como simulaciones se realicen. Es muy útil para poder comparar distintas simulaciones.
- **Elegir una simulación:** permite seleccionar una determinada simulación con el fin de analizarla o para sobrescribir los valores de la base de datos que tenga almacenada en ese momento.
- **Panel de control:** permite cambiar configuraciones interiores que gobiernan el funcionamiento de Vensim.

Barra de herramientas de dibujo

Contiene botones que permiten activar herramientas para construir el diagrama de flujos.



Basta colocar el puntero sobre el botón de la herramienta que necesitamos usar, y hacer clic (botón izqdo. del ratón) sobre él para activarla. A continuación se describen las herramientas:



Candado: el dibujo está bloqueado. El puntero del ratón puede seleccionar objetos del dibujo y variables del Espacio de Trabajo, pero no puede mover los objetos del dibujo.






Mano (Mover/Tamaño): mueve, cambia el tamaño y selecciona los objetos del dibujo: variables, flechas, comentarios...



Variables constantes y auxiliares: se utiliza para introducir las variables constantes y variables auxiliares del modelo.







Variables de estado: para crear variables de estado, cuyo valor cambia con el tiempo.

-  **Flecha (canal):** se utiliza para introducir, mediante flechas, las relaciones entre las variables del modelo (en dinámica de sistemas se la denomina canal de información).
-  **Variables de flujo:** se utiliza para introducir las variables de flujo del modelo. Sirve para dibujar los canales entre las variables de estado y si fuera necesario las fuentes y los sumideros (nubes).
-  **Variable sombra:** se utiliza para introducir una variable al modelo sin introducir sus causas.
-  **Comentario:** se utiliza para introducir comentarios al modelo.
-  **Borrar:** se utiliza para eliminar cualquier tipo de objeto del modelo.
- Y=X^z Ecuaciones:** se utiliza para crear y editar las ecuaciones de un modelo utilizando el Editor de Ecuaciones.

La barra de estado que aparece en la parte inferior de la ventana indica las propiedades de los símbolos que estamos insertando. Es posible especificar la polaridad de una flecha (relación positiva o negativa), así como darle color (p. ej. rojo a las negativas y azul a las positivas) etc.



HERRAMIENTAS ANALÍTICAS. Están en la barra lateral izquierda, y son estas:

-  **Árbol causal:** presenta gráficamente los factores causales que afectan a la variable seleccionada (Workbench Variable, aparece en la ventana de título).
-  **Árbol de usos:** presenta gráficamente los usos de la variable seleccionada
-  **Bucles (loops):** lista todos los bucles de feedback que pasan por la variable seleccionada.
-  **Documentación:** resumen de ecuaciones, definiciones, y unidades de medida del modelo.

Estas cuatro herramientas se pueden usar sin haber realizado ninguna simulación.





Los botones de la barra de herramientas superior permiten **configurar y ejecutar** una simulación.

El nombre "Current" indica el fichero de la simulación. Se pueden cargar otros con clic en los tres puntos



Los 3 botones de la dcha. activan las ventanas de: **Diagrama, Resultados, y Panel de control**, respectivamente.

Las restantes herramientas analíticas son:

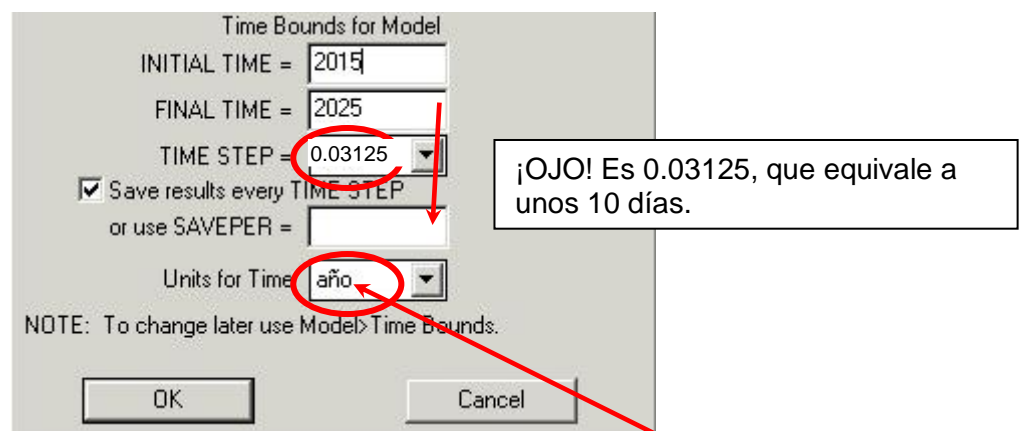
-  **Gráficos Causales:** permiten rastrear las causas del comportamiento de la variable que seleccionemos en el diagrama (con doble clic).
-  **Gráfico:** muestra el comportamiento de la variable que seleccionemos.
-  **Tabla:** genera una tabla de valores para la variable seleccionada
-  **Comparar simulaciones (Runs compare):** compara dos simulaciones.

EJERCICIO PRÁCTICO: crea un modelo, analiza su estructura, realiza simulaciones y analiza su comportamiento.

Para hacerte una idea del manejo básico de Vensim PLE, y siempre que la conexión a internet funcione adecuadamente, puedes ver este [Video tutorial](#) que dura apenas 5 minutos, pero antes anula el sonido porque no tiene comentarios audibles. Luego sigue las instrucciones siguientes.

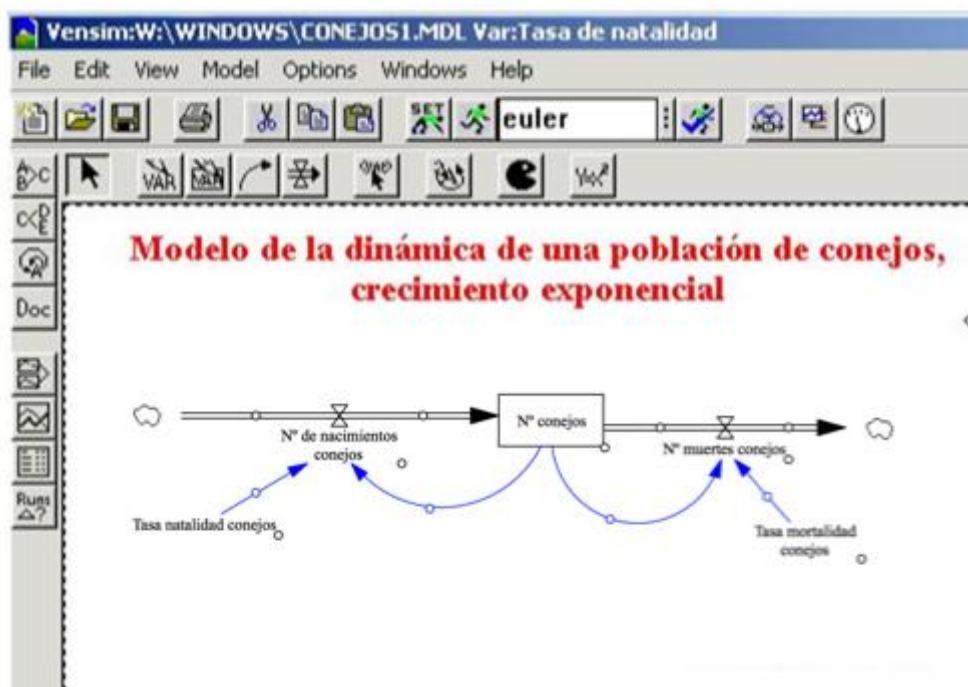
Vas a empezar construyendo un modelo sencillo y con poco detalle de la dinámica de una población de conejos. Deberá mostrar como varía el tamaño de dicha población (variable de estado) a lo largo del tiempo por efecto de los nacimientos y de las muerres (variables de flujo) que ocurren cada año. Los nacimientos dependen del tamaño de la población (N) y de la tasa de natalidad. Las muerres dependen de N y de la tasa de mortalidad. Ambas tasas son variables auxiliares.


Haz clic en "File" y en "New Model". Se abrirá una caja de diálogo para que especifiques el tiempo que durará la simulación y cada etapa de la misma. , **tal como ilustra la siguiente figura (presta mucha atención al rellenarlo)**:




Initial tiem **2015**, Final time **2025**, Time Step o intervalo de tiempo 11 días (**0.03125**), y la unidad de tiempo será el **año**. La lista desplegable ofrece unidades en inglés, pero escribe "año".

A continuación deberás dibujar un modelo similar al de la siguiente figura:





Para ello selecciona en primer lugar la herramienta **Variable de estado**  y haz clic en una posición adecuada para insertar el nombre de la variable. Escribe el nombre de la variable "Nº conejos" y pulsa **Enter**. Aparecerá en una caja por ser una variable de estado.

Ahora introduce la variable "Nº de nacimientos conejos", para ello escoge la herramienta de flujo 

y haz clic en la posición deseada para el primer extremo del símbolo (la nube). Mueve el puntero y **haz clic sobre "Nº conejos"**, aparecerá dibujado el flujo de "nacimientos".

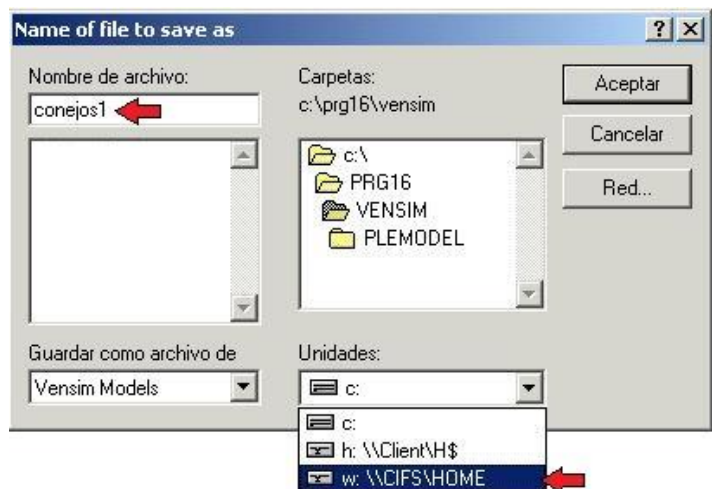
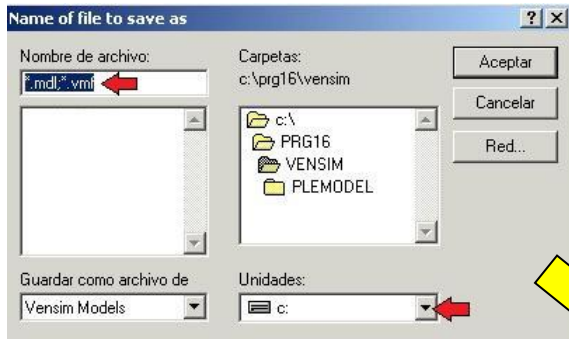
Repite el procedimiento para dibujar el flujo de "muertes", esta vez inícialo **haciendo clic sobre "Nº conejos"** y luego clic fuera de la caja de población a la derecha para finalizar.

Ahora selecciona la herramienta de variable auxiliar  e introduce las variables "Tasa de natalidad conejos" y "Tasa de mortalidad conejos". La primera afecta a los nacimientos, la segunda a las muertes.

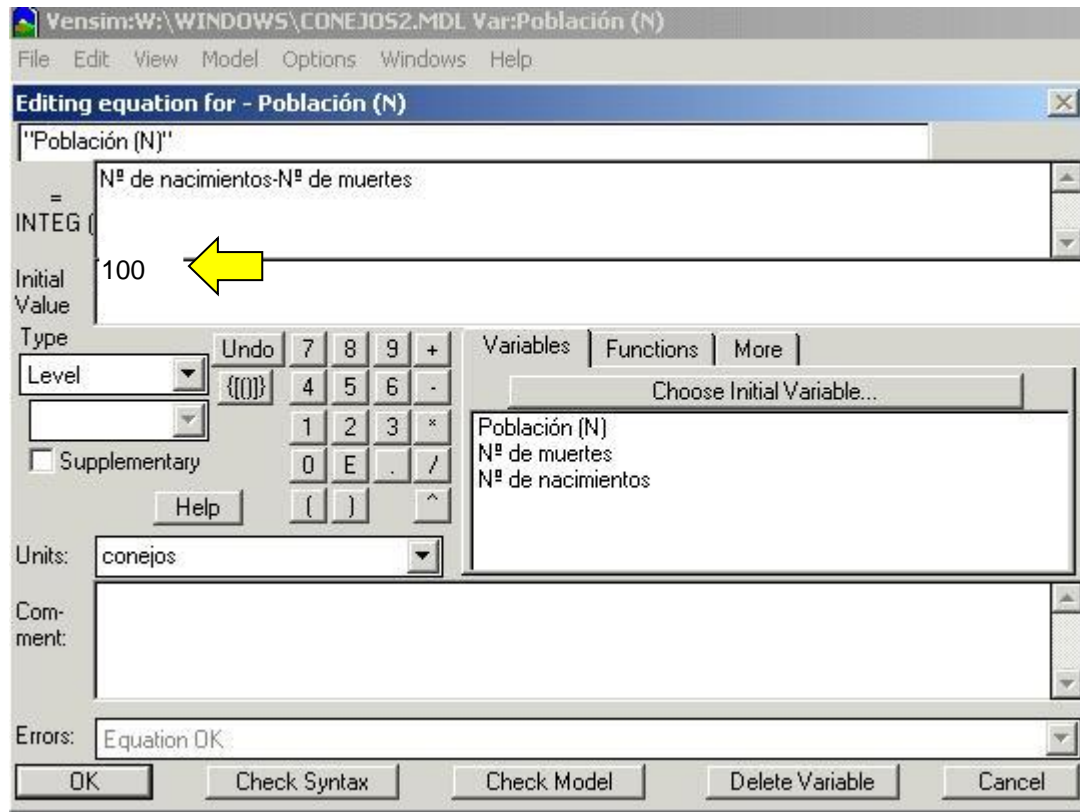
Seguidamente deberás usar la herramienta  y dibujar dos flechas para relacionar la tasa de natalidad con nacimientos y la tasa de mortalidad con muertes. Asegúrate de hacer clic encima de los nombres de las variables que vas a unir. Puedes curvar luego la flecha arrastrándola por su **anclaje** (pequeño círculo).

El número de individuos que hay en la población en un año dado influirá sobre los nacimientos y también sobre las muertes. Por tanto, usa la herramienta de flecha para establecer las relaciones entre "Nº conejos" y "Nº de nacimientos conejos", y luego entre "Nº conejos" y Nº de muertes conejos. Asegúrate que haces **clic sobre los nombres de las variables** que vas a relacionar. Si te equivocas puedes borrar. Para dibujar una flecha curva haz clic en "Nº conejos", luego en un punto intermedio y luego en nº de nacimientos conejos. Puedes modificar la curva arrastrando su punto blanco.

Guarda el diagrama con la estructura de tu modelo, haz clic en el icono del disco o bien en "File" y en "Save". Aparecerá una ventana de diálogo, en "Nombre de archivo" m, como p. ej. M1, y elige el directorio w\\CIFS\\HOME. El modelo se guardará en la carpeta "WINDOWS", dentro de la carpeta "Mis documentos".



Para poder realizar simulaciones es necesario introducir las ecuaciones que describen las relaciones entre las variables. Para ello pulsa el icono $Y=X^2$. En el diagrama de Forrester aparecerán los nombres de todas las variables en recuadros negros. Haz clic sobre “Población”, aparecerá una ventana de diálogo como esta:



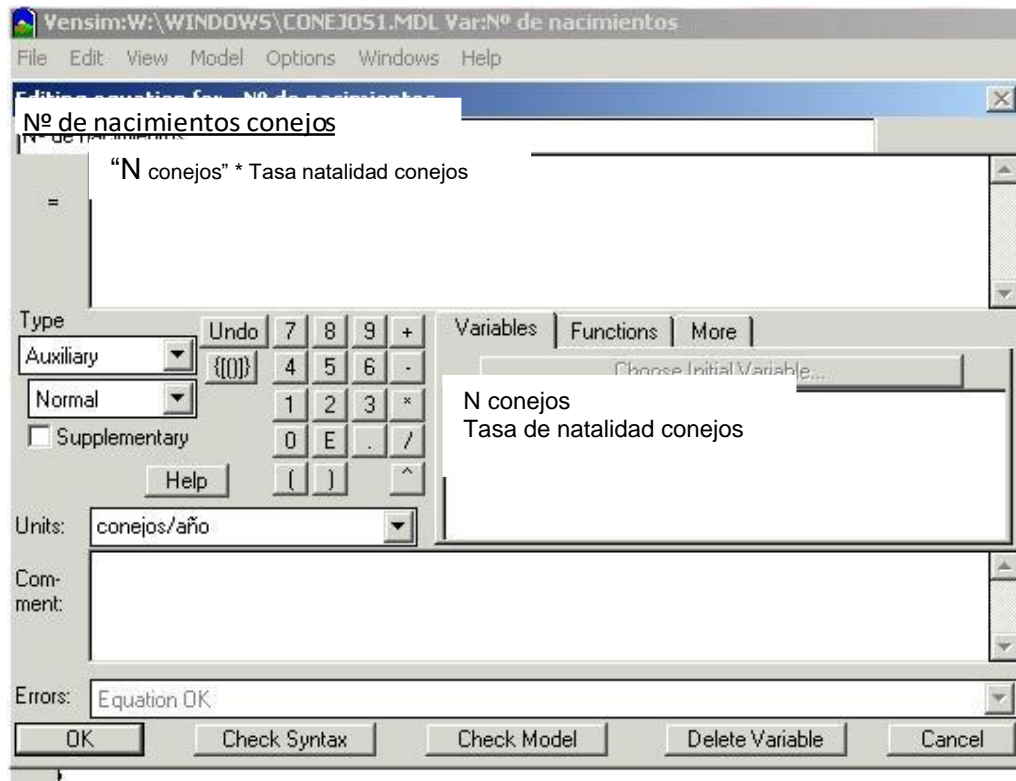
Observa que en la línea superior azul debe aparecer el nombre de la variable cuya ecuación vas a editar. En la 2ª línea debe ir la ecuación, observa que el programa ha interpretado el diagrama que has dibujado y ya la ha rellenado. En realidad internamente establece ecuaciones diferenciales que luego resolverá durante la simulación utilizando el método de integración que selecciones. Fíjate que es posible utilizar distintos operadores y funciones para construir ecuaciones más complejas. En otros casos tendrás que escribir una ecuación en la que deberán entrar algunas de las variables del modelo. Basta con hacer clic sobre el nombre de la variable que necesites en la lista de variables que aparece en la parte de la derecha. Las dos tasas no aparecen porque son variables auxiliares cuyo valor establecemos en cada simulación como una constante.

En la 3ª línea podemos introducir un valor inicial para la variable, cosa que precisamente nos interesa en este caso. Digamos que el **valor inicial** (Initial value) es de **100** conejos.

En la cuarta línea podemos definir el tipo de variable de que se trata, aparece “Level” porque es una variable de nivel o de estado. Su nivel o magnitud cambia con el tiempo dependiendo del balance entre entradas (nacimientos) y salidas (muertes).

Seguidamente, y esto es muy importante, **hay que definir las unidades** de la variable. Atención, las unidades de las distintas variables han de ser congruentes, debes escribir cada cosa siempre de la misma forma. Aquí especifica que la unidad de “Nº conejos” es “conejos”. Termina haciendo clic en el botón “OK”. Si hay algún error aparecerá una indicación en la última línea “Errors”. P. ej., si la unidad de “Nº conejos” es “conejos”, la tasa de mortalidad NO puede ser “conejo/año” (conejo en singular).

Prosigue editando ahora la ecuación para Nº de nacimientos conejos. Teniendo seleccionada la herramienta “Ecuaciones” $y=xz$ haz clic en el diagrama sobre el nombre de dicha variable. Posiciona el cursor en la caja que hay a la dcha. del signo =, y haz clic sobre “Nº conejos”, luego sobre el símbolo de multiplicación x, y luego sobre “Tasa de natalidad conejos”. Las unidades serán “conejos/año”. Quedará así:



Haz lo mismo para la variable “Nº de muertes conejos”, que debe ser igual a Nº conejos x Tasa de mortalidad conejos, y cuyas unidades serán también “conejos/año”.

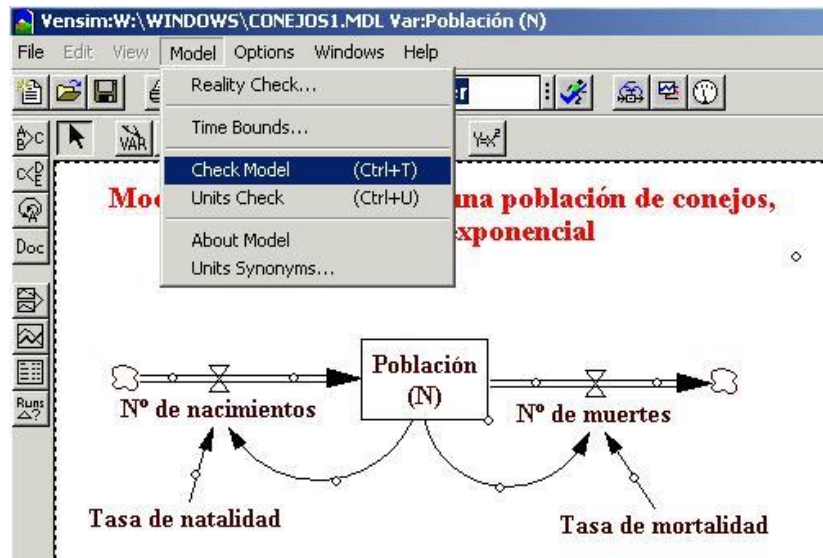
Edita la ecuación de la “Tasa de natalidad conejos”. Supongamos que 2. Introduce este valor en el segundo recuadro blanco, a la derecha del signo =

Las unidades de la Tasa de natalidad deberán ser “1/año”. Esto es debido a que la Tasa de natalidad multiplica a la Población (N), cuyas unidades son “conejos”, para determinar el Nº de nacimientos en “conejos/año”. Por ello, para que exista congruencia en las unidades a uno y otro lado del signo igual deberá ser de esta forma:

$$\text{Nº de nacimientos conejos (conejos/año)} = \text{Nº conejos (conejos)} \times \text{Tasa de natalidad conejos (1/año)}$$

Procede de forma similar con la “Tasa de mortalidad conejos”. Esta depende de la incidencia de la mixomatosis, de la enfermedad hemorrágica vírica (EHV), de la caza y de la depredación. Supongamos que sea 0.02 (usa el punto como separador decimal) y las unidades son también “1/año”.


Ahora comprueba el modelo, para ello haz clic en “Model” y luego en “Check Model”. Si está OK comprueba la coherencia de las unidades haciendo clic en “Model” y luego en “Units Check”.

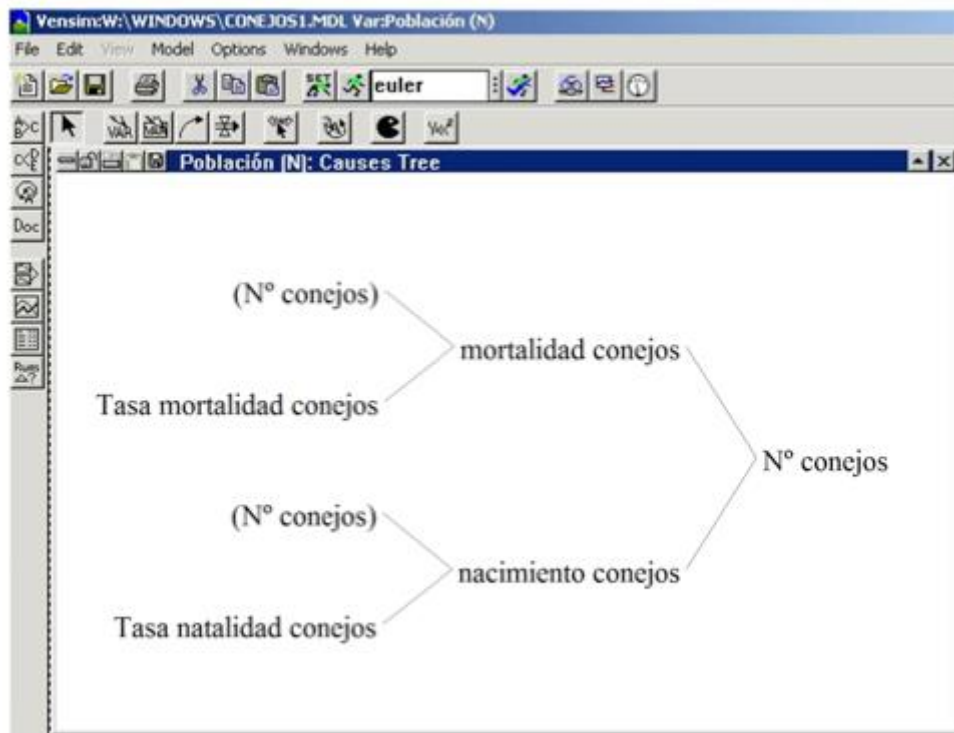


En caso de que haya un error en las unidades aparecerá una ventana con un análisis de la causa del error. Fíjate bien y realiza las correcciones necesarias.

Si todo está correcto puedes empezar a analizar la estructura del modelo. Selecciona la variable

Población (haz click dos veces sobre ella, asegúrate bien), y luego haz clic en la herramienta

“Árbol causal”  y aparecerá una ventana con un gráfico que muestra la red de relaciones causa-efecto que influyen sobre el tamaño de la Población. Observa los iconos que aparecen a la izqda. de “Nº conejos: Causes Tree”. Haz clic en el icono del portapapeles (Export Windows content) y pégalo en el documento Word de tu trabajo. Atención, si no reduces un poco el ancho del árbol causal antes de copiarlo puede luego salir mal en Word.

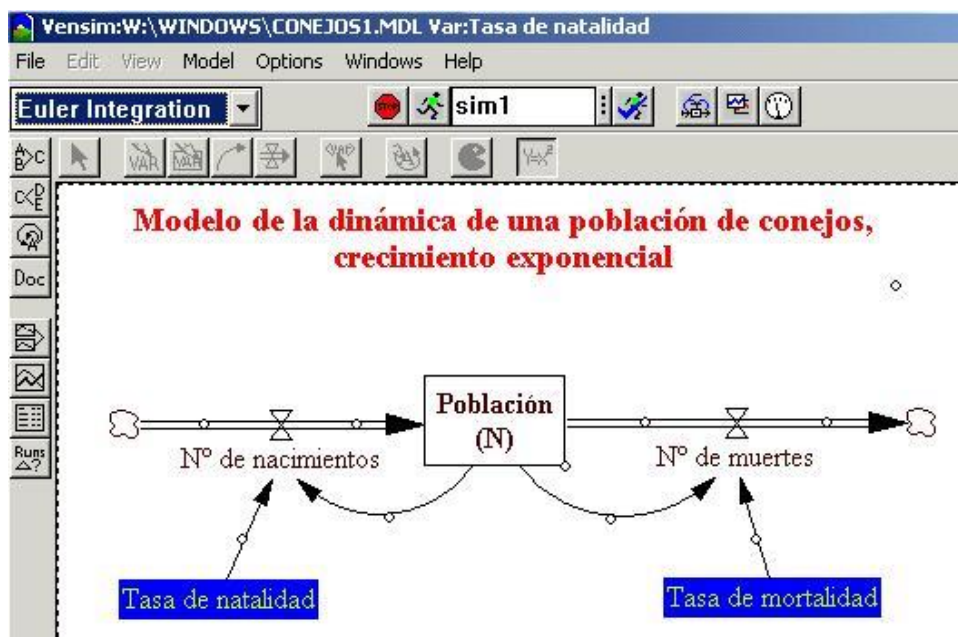


Igualmente puedes utilizar la herramienta “Bucles” para analizar los bucles de retroalimentación que aparecen en el modelo. También la herramienta “Doc” que proporciona documentación sobre la estructura del modelo, ecuaciones, unidades de las variables, etc. Hazlo y pega tus resultados en el documento Word de tu trabajo. Añade un breve comentario explicando que es cada cosa.

Simulación 1. Dale nombre a la simulación que vas a realizar, escribe p. ej. “sim1”



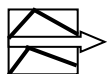
Haz clic sobre el botón “SET”, escoge el método de integración de Euler (por defecto). En amarillo sobre fondo azul aparecen las dos Tasas, son constantes y no cambian durante la simulación, pero se puede modificar su valor antes de iniciar una simulación.



En la simulación 1 la Tasa de natalidad es de 2 y la Tasa de mortalidad es de 0.02

Una vez fijados sus valores, haz clic sobre el **icono del corredor** (Run Simulation) . Los resultados se guardarán en el fichero sim1.vdf.

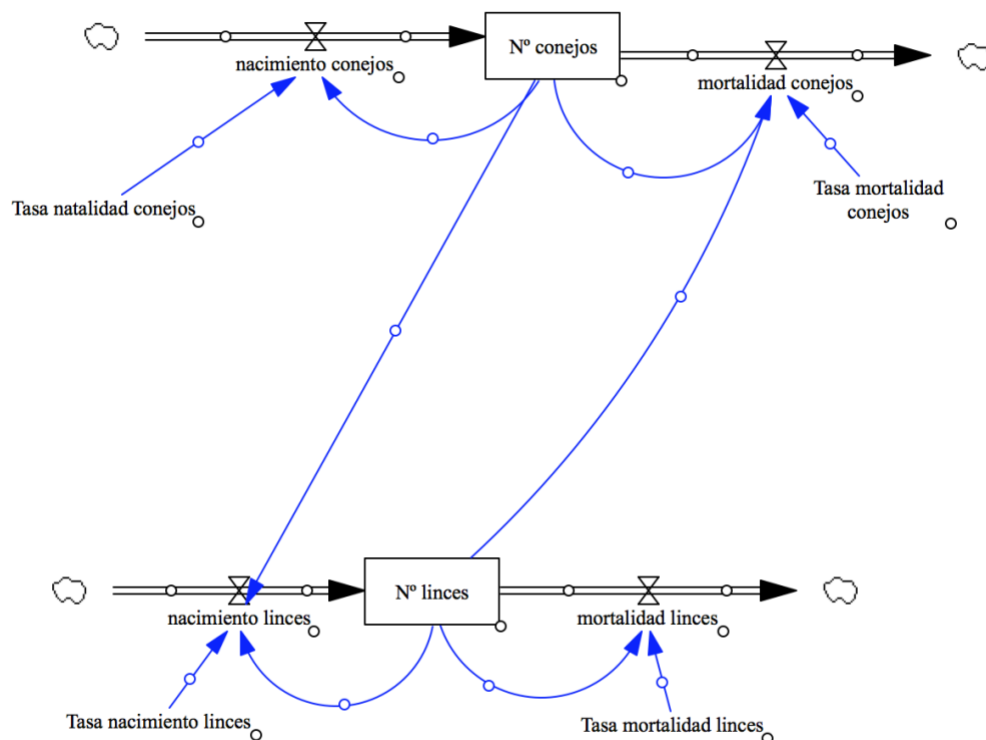
Para ver los resultados haz clic dos veces en la variable “N conejos”, y luego usa las herramientas



para analizar la dinámica del modelo. Por ahora no guardes estos gráficos.

Modelo depredador-presa

Ahora vamos a incorporar depredadores (linces) a nuestro modelo. Veremos cómo se modifica la curva de crecimiento exponencial cuando hay otra especie que se alimenta de los conejos. Para diseñar este nuevo modelo incorporaremos las funciones de crecimiento poblacional del linco, así como los bucles de retroalimentación positiva y negativa que ya conocemos. Para que el modelo tenga un recorrido temporal más largo, cambiaremos en primer lugar la variable FINAL TIME. En esta ocasión pondremos el año 2050. Para ello vamos al menú model-> time bounds y ahí cambiamos FINAL TIME. Una vez hecho esto, debemos añadir las variables y elementos necesarios para que el modelo tenga este aspecto:



Las nuevas variables añadidas tienen los siguientes valores:

- Tasa nacimiento linces = 0.01
- Tasa mortalidad linces = 0.6
- $N \text{ linces} = \text{nacimiento linces} - \text{mortalidad linces}$
- $N \text{ inicial de linces} = 15$
- $\text{Nacimiento linces} = N \text{ linces} * \text{Tasa nacimiento linces} * N \text{ conejos}$
- $\text{Mortalidad linces} = N \text{ linces} * \text{Tasa mortalidad linces}$
- $\text{Mortalidad conejos} = N \text{ conejos} * \text{Tasa mortalidad conejos} * N \text{ linces}$

IMPORTANTE: Las unidades de las variables de linces, son “linces” o “linces/año. Recuerda que las tasas tienen 1/año como unidad.

Cuando tengas el modelo listo, ejecútalo, copia las gráficas de tamaño poblacional de ambas especies y discute los resultados en el documento de Word respondiendo a las siguientes preguntas: ¿siguen los conejos experimentando un crecimiento exponencial en su número?

¿observas una tendencia en el número de conejos? ¿Tiende a haber más lince o más conejos?
¿a qué se debe esto?

Modelo de crecimiento logístico de una población

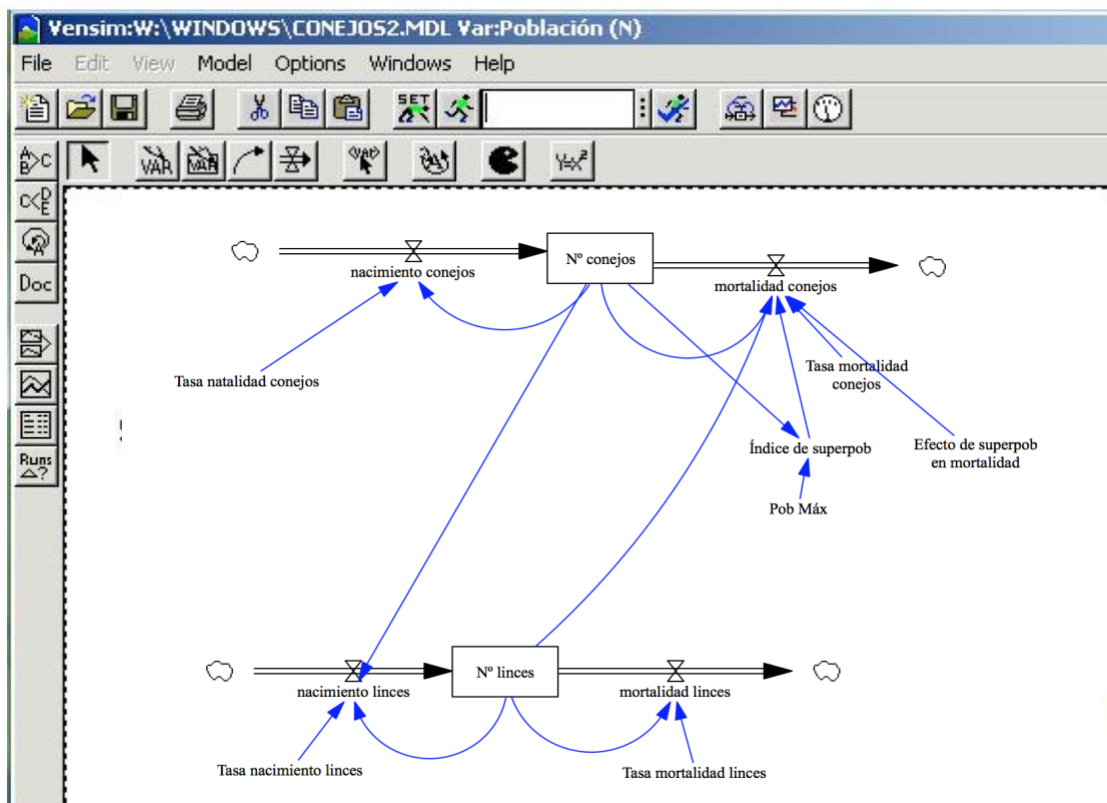
Modifica el modelo anterior para obtener uno nuevo que simule un **crecimiento poblacional de tipo logístico** en los conejos, sujeto a limitación de recursos.

Para ello tendrás que establecer una variable auxiliar que represente la **capacidad portadora (K)**, que es el mayor tamaño de población que se puede mantener en equilibrio. Nómbrala como "**Pob Max**", y asígnale un valor constante (p. ej. **250**) y como dimensiones "conejos".

Necesitarás establecer un "**índice de superpoblación**", es decir, una variable que compare el tamaño actual de la población (Nº conejos) con el tamaño máximo sostenible (K). Puedes usar el cociente entre ambas: "**Índice de superpob**" = $\text{Nº conejos} / \text{Pob Max}$ de forma que será próximo a cero cuando el tamaño de la población sea pequeño, y tenderá a 1 a medida que su valor vaya aumentando y haciéndose más parecido al de Pob Max. Este índice carece de dimensiones, por tanto en "Units" pondremos "**dmnl**" (dimensionless, sin dimensiones).

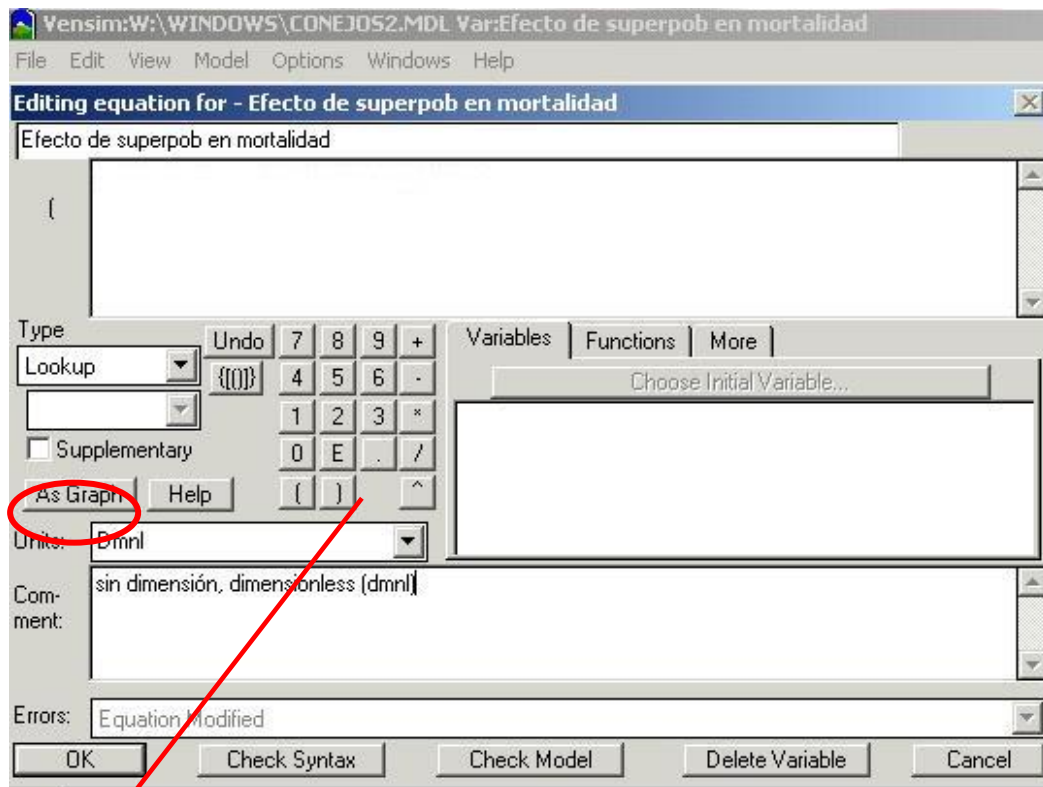
Finalmente tendrás que añadir una nueva variable "**efecto de superpob en mortalidad**" que traduzca el efecto de una superpoblación creciente en aumentos cada vez mayores de la mortalidad; es decir, convertirá los valores del "índice de superpoblación" en incrementos del nº de muertes, pero siguiendo una relación de tipo exponencial. Este tipo de variables se denominan "**Lookup**" o tabla de consulta, ya que para cualquier valor dado de la variable de entrada (índice de superpob. en nuestro caso), devolverá un valor de incremento de la mortalidad.

En definitiva, el diagrama de Forrester quedará como sigue:

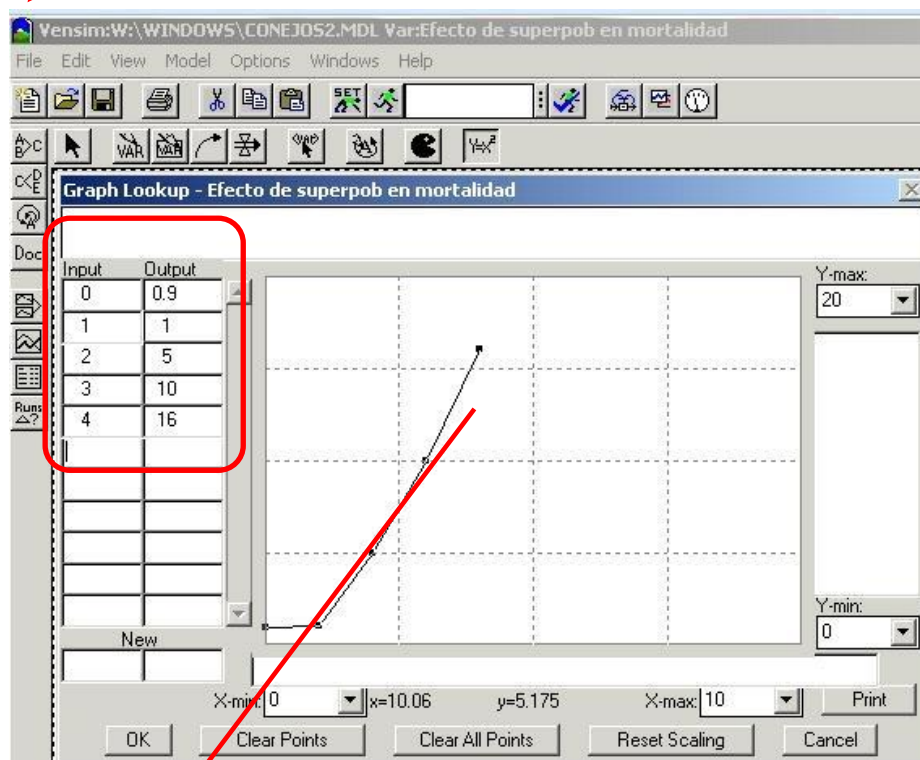


¿Cómo creamos la variable tipo "Lookup" Efecto de la superpoblación en la mortalidad?

Añadimos una variable auxiliar y escogemos Type "Lookup", y en "Units" ponemos "Dmnl"



y luego hacemos clic en el botón **"As graph"**. Saldrá esta otra ventana de diálogo:



Rellena las columnas **"Input"** (valores de entrada de Índice de superpob) y **"Output"** (valores en que se convierten) con los valores que ves en la tabla de la figura. En otros casos podrías crear la curva que relaciona las dos variables de forma gráfica, haciendo clic en el área de gráfico para ir añadiendo puntos. Confirma en OK.

Por último falta por redefinir la variable "Nº de muertes". Su valor en cada paso de la simulación dependerá del producto de Nº conejos x Tasa de mortalidad, pero ahora multiplicado por un factor cuya magnitud vendrá determinada por el valor de "Efecto de la superpoblación en la mortalidad" que corresponda al valor del "índice de superpoblación". En Vensim la nueva ecuación para la

variable "mortalidad conejos" la definiremos así: **N° conejos x Tasa de mortalidad conejos x Efecto de superpoblación en mortalidad (Índice de superpoblación) x N° lince**

Ejecuta el modelo con la parametrización que has considerado. Genera las gráficas de evolución poblacional de lince y conejos, pégalas en tu documento de Word y discute los resultados contestando las siguientes preguntas: ¿Qué efecto tiene el "freno" logístico que hemos introducido en el crecimiento poblacional del conejo?, ¿Y sobre la población de lince?. Según nuestro modelo, ¿estamos ante una población estable en el tiempo?

Para finalizar tienes que cambiar algún parámetro del modelo para que la población de lince y de conejos mejore su "estabilidad" potencial en el tiempo. Puedes modificar las tasas de natalidad o mortalidad y también cambiar el efecto del "freno logístico" que hemos incorporado a la población de conejo. Para ello basta con editar la gráfica Lookup del efecto de la superpoblación en la mortalidad de conejos. Al cambiar alguno de estos parámetros, ¿qué efecto observas en los resultados? ¿A qué crees que se debe?