

Manual

Introducción al desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas

Autores:

Hilda Consuelo Zamora Maldonado

Instituto de Ingeniería. UNAM

V. Sophie Avila Foucat

*Instituto de Investigaciones Económicas.
UNAM*

2023



Laboratorio Nacional
de Resiliencia Costera

Responsables del proyecto:

V. Sophie Avila Foucat. *Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM*
Alec Torres Freyermuth. *Instituto de Ingeniería. UNAM*
Fernando Nuno Dias Marques Simões. *Facultad de Ciencias. UMDI-Sisal. UNAM*

Autores:

Hilda Consuelo Zamora Maldonado
Instituto de Ingeniería. UNAM
V. Sophie Avila Foucat
Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM

Citar el documento como:

Zamora-Maldonado, H. C., V. S. Avila-Foucat (2023) Manual: Introducción al Desarrollo de un Modelo de Dinámica de Sistemas. México. UNAM.

Licencia:

Manual: Introducción al Desarrollo de un Modelo de Dinámica de Sistemas © 2023 by Zamora-Maldonado, H. C., V. S. Avila-Foucat is licensed under Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Este documento se realizó con apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT IV300123.

Índice

1.	<i>Guía de uso</i>	1
1.1.	Íconos del manual	1
2.	<i>Introducción</i>	2
3.	<i>Definición: Dinámica de Sistemas</i>	2
4.	<i>Etapas de la modelación</i>	2
4.1.	Diagrama causal o modelo mental.....	3
1.	Definir el problema.....	3
2.	Identificar las variables clave.....	4
4.2.	Diagrama de flujo	8
3.	Identificar variables de estado y variables de flujo	8
4.3.	Implementación y especificación del modelo	12
4.	Especificación de parámetros.....	12
5.	Implementación del modelo	15
6.	Calibración y validación del modelo	16
7.	Ejemplo numérico básico	19
8.	Comunicación de los resultados del modelo.....	21
5.	<i>Recomendaciones finales</i>	22
6.	<i>Bibliografía</i>	23
7.	<i>Ejercicio</i>	24

1. Guía de uso

A través de este manual, los usuarios pueden aprender los conceptos fundamentales de la dinámica de sistemas, se explican conceptos como stocks o variables de estado, flujos y retroalimentación. Se detalla el proceso de construcción de un modelo, desde la identificación de los elementos clave del sistema hasta la formulación de ecuaciones diferenciales que describen las relaciones entre esos elementos, además de guiar en la identificación de variables clave, relaciones de retroalimentación, bucles de refuerzo y equilibrio, y cómo estos elementos interconectados pueden influir en la evolución de un sistema. Este manual proporcionará a los usuarios las bases conceptuales y metodológicas de la dinámica de sistemas lo cual les permitirá contar con las bases para poder consultar literatura especializada en el tema con mayor seguridad y claridad.

1.1. Íconos del manual



ATENCIÓN



SUGERENCIA



CONCEPTO

2. Introducción

Desarrollar un modelo de dinámica de sistemas es un proceso complejo que implica la representación y el análisis de sistemas complejos que cambian con el tiempo. A través de la modelación y simulación, podemos obtener insights valiosos sobre cómo tomar decisiones y diseñar intervenciones en el sistema real. Como con cualquier herramienta, la calidad de los resultados depende de la robustez y profundidad del modelo, por lo que siempre es esencial ser crítico y considerar las limitaciones del mismo. A continuación, se presenta un manual paso a paso sobre cómo desarrollar un modelo de dinámica de sistemas.

Este manual es una introducción breve a la dinámica de sistemas. Para una comprensión más profunda, se recomienda estudiar literatura especializada y realizar cursos o talleres en el tema. Para un estudio más profundo, te recomendamos buscar literatura y recursos en línea específicos sobre dinámica de sistemas, como "Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers" de Jay W. Forrester (Forrester, 1958) o "Business Dynamics" de John Sterman (Sterman, 2000).

3. Definición: Dinámica de Sistemas

La dinámica de sistemas es una aproximación metodológica interdisciplinaria para entender y modelar el comportamiento complejo de sistemas en distintos contextos. Fue desarrollada originalmente en la década de 1950 por Jay W. Forrester y ha sido ampliamente utilizada para modelar sistemas socioeconómicos, ecológicos, biológicos y más. Por ejemplo, *Los Límites de Crecimiento* (Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, William W. Behrens III, 1972) publicado por el Club de Roma en 1972 (Meadow et al., 1972). Esta publicación demostró que el crecimiento es limitado debido al agotamiento de los recursos naturales. El mensaje importante fue que nuestro modo de vida (occidental) es insostenible. Sorprendentemente, las predicciones resultaron ser en su mayoría ciertas (Meadow et al., 2004).

Los modelos de dinámica de sistemas, se basa en la representación de los sistemas mediante ecuaciones diferenciales, retroalimentaciones, bucles y flujos, que permiten simular y analizar la evolución temporal de dichos sistemas. Esta herramienta metodológica ayuda a visualizar las interacciones y la interdependencia entre los componentes del sistema a analizar, identificar patrones de comportamiento y advertir posibles escenarios futuros. La dinámica de sistemas se aplica en una amplia variedad de áreas, incluyendo la biología, economía, ingeniería y ciencias sociales, para estudiar desde sistemas ecológicos hasta estructuras organizacionales y políticas públicas.

4. Etapas de la modelación

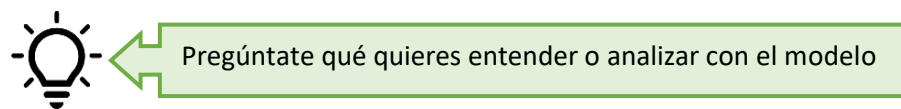
Las etapas de modelación en dinámica de sistemas son pasos críticos que buscan representar de forma simplificada, pero significativa, la estructura y dinámica del sistema en estudio. Estas etapas, que van desde la conceptualización del problema hasta la validación del modelo, permiten traducir observaciones del mundo real a ecuaciones y diagramas, con el objetivo de simular, analizar y finalmente, entender las dinámicas subyacentes. En este manual nos embarcaremos en un recorrido por estas etapas,

descubriendo cómo cada una aporta al desarrollo de modelos robustos y útiles para la toma de decisiones. A través de este recorrido, obtendremos una comprensión más profunda de cómo esta metodología puede ayudarnos a abordar problemas complejos y a tomar decisiones informadas en contextos dinámicos.

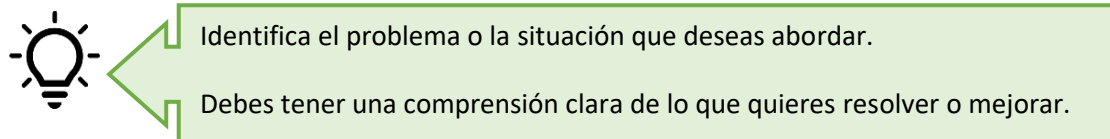
4.1. Diagrama causal o modelo mental

1. Definir el problema

Antes de comenzar a construir un modelo de dinámica de sistemas, es fundamental comprender claramente el problema que se desea abordar. Esto implica definir los objetivos del modelo y las variables clave que intervienen en el sistema.



La definición del problema en dinámica de sistemas es un paso crítico en el proceso de modelado y resolución de problemas complejos. Un enfoque adecuado en esta etapa es fundamental para comprender y abordar los problemas de manera efectiva. Aquí te proporcionamos recomendaciones paso a paso sobre cómo definir un problema en dinámica de sistemas:



1.1. Paso 1: Establecimiento del alcance

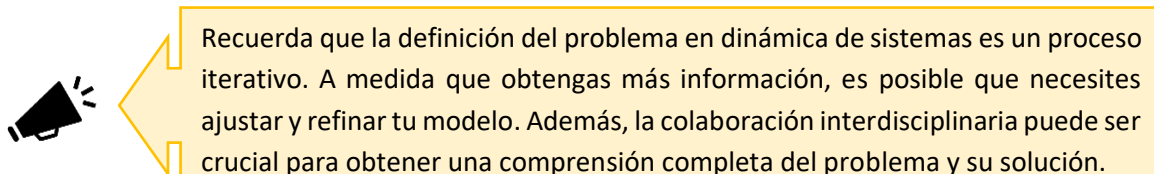
Define los límites de tu problema. ¿Qué aspectos o variables son relevantes y cuáles no lo son? Establece fronteras claras para mantener el enfoque.

1.2. Paso 2: Comprensión del contexto

Investiga y comprende el contexto en el que se encuentra el problema. Esto incluye aspectos sociales, económicos, políticos y tecnológicos que puedan influir en la dinámica del sistema.

1.3. Paso 3: Identificación de variables clave

Identifica las variables clave que están involucradas en el problema. Estas variables pueden ser físicas, económicas, sociales o cualquier otro factor relevante.



2. Identificar las variables clave

Identifica las variables que son relevantes para el problema. La identificación de variables clave en un modelo de dinámica de sistemas es un paso fundamental para comprender y analizar un sistema complejo. El enfoque sistémico del método añade un lenguaje que aporta nuevas formas de ver los problemas complejos. Las herramientas que aporta la dinámica de sistemas, desde los diagramas causales hasta los modelos numéricos, nos van a permitir ver los sistemas que están en nuestro entorno mediante una óptica diferente que nos ayudará a identificar aspectos en los que posiblemente no hayamos pensado y que, de este modo, nos permita alcanzar una visión más rica del problema en análisis. Las variables por identificar son aquellas que tienen un impacto significativo en el comportamiento del sistema y, por lo tanto, deben ser cuidadosamente seleccionadas y modeladas para obtener resultados útiles.

2.1. Paso 1: Evaluar la relevancia y significancia de las variables

No todas las variables son igualmente importantes. Evalúa la relevancia y significancia de cada variable en función de los objetivos del modelo y el análisis que deseas realizar. Pregúntate:

- ¿Qué variables tienen el mayor impacto en el comportamiento del sistema?
- ¿Cuáles son las variables críticas para entender el sistema?
- ¿Cuáles son las variables que más influyen en los resultados que deseas obtener?



Para identificar variables clave en el problema a analizar es importante realizar una investigación a través de fuentes de información secundaria (revistas científicas principalmente) y complementar la información con la información derivada de la implementación de entrevistas a actores relevantes (tomadores de decisiones, funcionarios, ONGs, actores locales, expertos, entre otros).

EJEMPLO: En el siguiente párrafo, se identifican las variables del problema descrito.

Este ejercicio captura la dinámica de dos poblaciones típicas de depredador-presa, que puede servir para analizar problema del tipo **“la población de conejos tiene importantes oscilaciones que queremos reducir”**.

Una investigación previa nos señala como causantes de estas oscilaciones a los zorros, y hacemos una lista de las variables que se relacionan con el problema.

Variables identificadas: - población de conejos - nacimientos de zorros - población de zorros - defunciones de zorros - nacimientos de conejos - vida media del zorro - muertes de conejos - tasa de natalidad del zorro - vida media del conejo - necesidades alimenticias del zorro - tasa de natalidad del conejo - población sostenible de conejos.

2.2. Paso 2: Identificar las relaciones entre las variables

Observa cómo las variables se relacionan entre sí en el sistema. Pregúntate si existe una relación causal entre ellas. Una relación causal significa que un cambio en una variable afectará a otra.

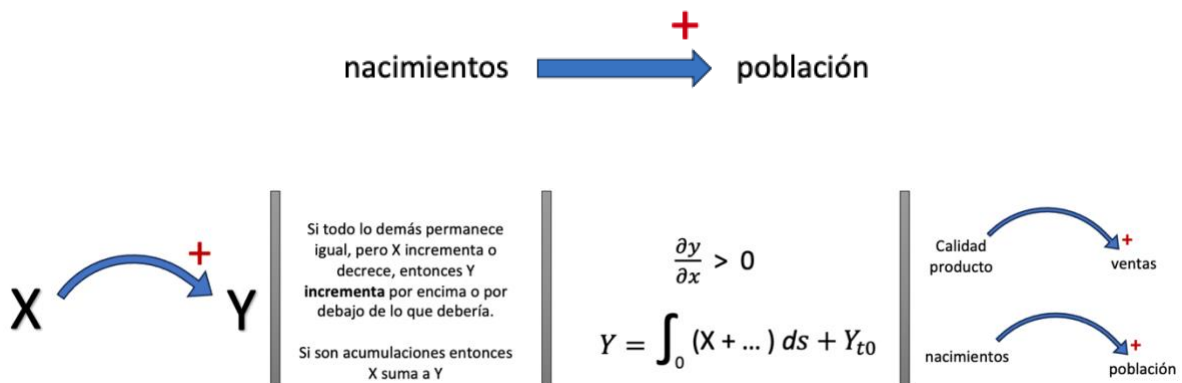
2.3. Paso 3: Utilizar diagramas de causales, modelos mentales o diagramas de flujo causal

Una forma efectiva de representar las relaciones causales es mediante diagramas de influencia o diagramas de flujo causal. Estos diagramas muestran las conexiones entre las variables y las flechas indican la dirección de la influencia. Por ejemplo, una flecha que va desde A hacia B indica que un cambio en A causa un cambio en B.



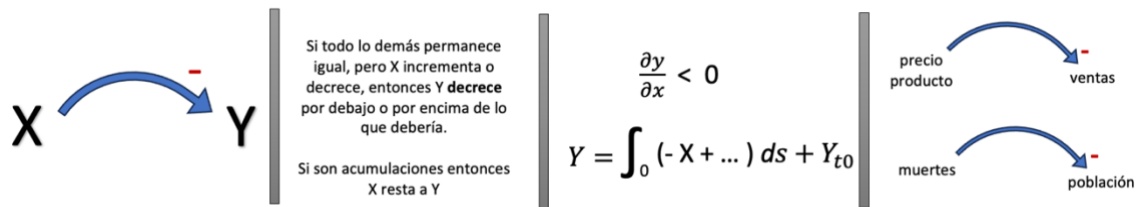
2.4. Paso 4: Definir la naturaleza de las relaciones

Es importante especificar la naturaleza de las relaciones entre las variables. Pueden ser relaciones positivas o negativas. Una **relación positiva** significa que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace (y viceversa) esta relación es directamente proporcional.



Una **relación negativa** implica que cuando una variable aumenta, la otra disminuye (y viceversa), esta relación es inversamente proporcional.

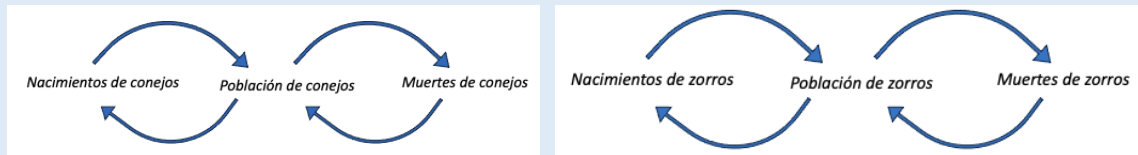




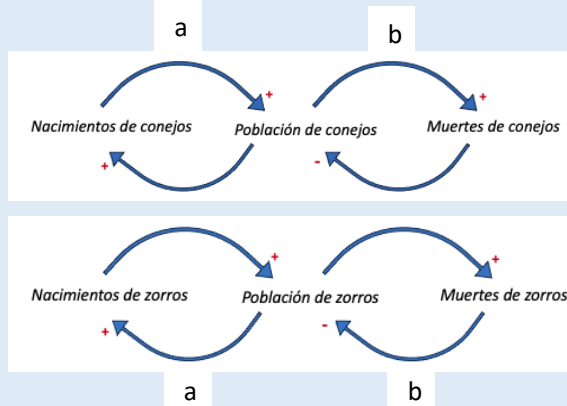
EJEMPLO: De la lista de variables previamente identificadas, se definen las relaciones entre ellas empleando flechas para definir la dirección de la relación y se identifica la polaridad de la relación.

- población de conejos - nacimientos de zorros - población de zorros - defunciones de zorros- nacimientos de conejos - muertes de conejos

Paso 1. Identifica 2 poblaciones (zorros y conejos). Cada población está caracterizada por su dinámica (nacimientos y muertes). Coloca las variables asociadas a cada población de la siguiente manera



Paso 2. Señala la polaridad de la relación entre las variables



¿Cómo describir esta relación entre variables?

a) Mayor población de conejos/zorros, mayor número de muertes de conejos/zorros; Mayor número de muertes de conejos/zorros, **menor** población de conejos/zorros.

b) Mayor población de conejos/zorros, mayor número de nacimientos de conejos/zorros; Mayor número de nacimientos de conejos/zorros, **mayor** población de conejos/zorros.

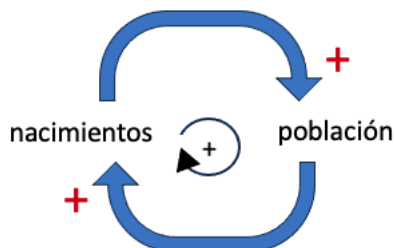
2.5. Paso 5: Bucles de retroalimentación

Los bucles de retroalimentación son componentes fundamentales en la dinámica de sistemas. Estos bucles representan cómo ciertas variables en un sistema interactúan entre sí, generando un efecto de retroalimentación que puede amplificar o amortiguar los cambios en el sistema a lo largo del tiempo. Los bucles de retroalimentación se dividen en dos categorías: bucles de retroalimentación positiva y bucles de retroalimentación negativa.

Retroalimentación Positiva (bucle de refuerzo): Este tipo de bucle ocurre cuando un cambio en una variable provoca un cambio en otra variable en la misma dirección, lo que a su vez refuerza el cambio

original. Es decir, amplifica o refuerza la acción inicial. Esto puede llevar a un crecimiento exponencial o a una espiral fuera de control en el sistema.

Ejemplo: El aumento en el número de nacimientos en una población incrementa el tamaño de esa población y una población cada vez más grande tendrá mayor número de nacimientos.



Retroalimentación Negativa (bucle de equilibrio): Este tipo de bucle se produce cuando un cambio en una variable lleva a un cambio en otra variable en la dirección opuesta, contrarrestando o equilibrando el cambio original. Estos bucles tienden a estabilizar los sistemas.

Siguiendo el ejemplo anterior, una población que crece exponencialmente puede regular su crecimiento a través de las muertes.

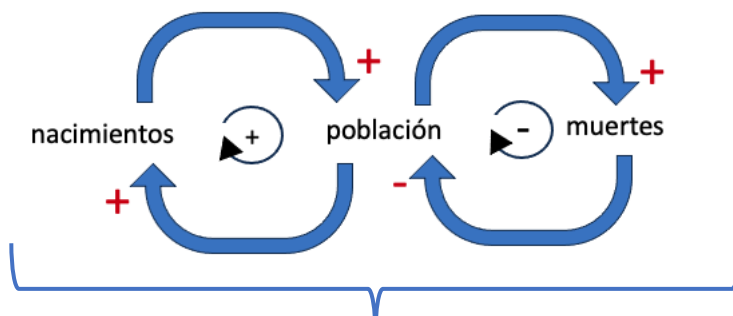


Diagrama causal

Todos los ciclos negativos tienen metas o estados deseados del sistema. En este ejemplo podríamos responder a la pregunta: ¿cuál es el estado deseable del tamaño de la población?

Los ciclos negativos comparan el estado actual con la meta, y tratan de corregir la discrepancia entre ellas. En este ejemplo, el número de muertes en el tiempo estaría regulando el tamaño de la población hasta alcanzar el estado deseado.

2.6. Paso 6: Verificar y validar las variables clave y las relaciones causales

Una vez que hayas identificado las variables clave, valida tus elecciones a través de la revisión de expertos, comparación con datos históricos si están disponibles y, si es posible, pruebas de sensibilidad más rigurosas [Ver paso 4.2. Paso 2]. Antes de utilizar las relaciones causales en tu modelo de dinámica de

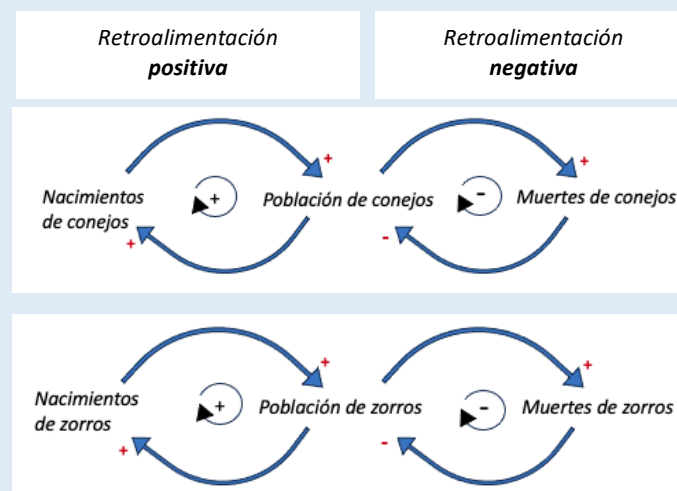
sistemas, verifica que sean lógicas y coherentes con la realidad. Puedes hacerlo consultando expertos en el campo o utilizando datos históricos para comprobar si las relaciones propuestas son consistentes.



Considera que:

- Los nombres de las variables deben ser sustantivos simples o compuestos.
- Las acciones (verbos) y adjetivos son capturados por los vínculos (flechas) entre las variables.
- El diagrama causal captura la estructura del sistema, no su comportamiento.

EJEMPLO: Una vez que se identificaron las dinámicas centrales del problema y se asignaron las relaciones de causalidad empleando flechas con polaridad, es importante identificar los bucles de retroalimentación.



4.2. Diagrama de flujo

3. Identificar variables de estado y variables de flujo

En un modelo de dinámica de sistemas, las variables se dividen comúnmente en dos categorías principales:

Variables de estado: Son aquellas que cambian con el tiempo y representan el estado actual del sistema. Estas son cruciales para comprender la evolución del sistema a lo largo del tiempo.

Variables de flujo: Son aquellas que afectan al sistema desde el exterior. Estas pueden ser controladas o exógenas y representan las fuerzas que influyen en el sistema. Identifica las variables de entrada relevantes para tu modelo.

El desarrollo de ecuaciones de estado y de flujo en dinámica de sistemas es fundamental para modelar y entender sistemas complejos. Aquí se presenta una introducción básica sobre cómo desarrollar estas ecuaciones.

3.1. Paso 1. Variables de estado y de flujo

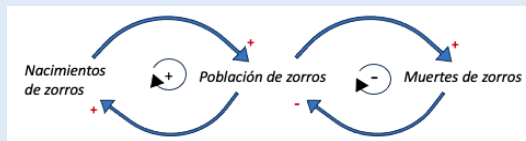
La dinámica de sistemas es un enfoque para comprender la estructura y el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo. Se utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales para representar el sistema.

Para cada variable de estado, desarrolla ecuaciones de flujo que describan cómo cambian con el tiempo. Estas ecuaciones pueden ser lineales o no lineales, dependiendo de la naturaleza del sistema. Las ecuaciones de flujo deben reflejar las relaciones causales identificadas en la etapa anterior (4.1. Diagrama de flujo o diagrama mental).

3.2. Paso 2. Identificación de variables de estado (stocks) y variables de flujo

Estas ecuaciones representan las variables acumulativas, de estado (stocks) en el sistema. Se pueden visualizar como "depósitos" o "tanques" que acumulan o pierden material a lo largo del tiempo. Un sistema dinámico se caracteriza por su estado, que es un conjunto de variables que describen completamente su comportamiento en un momento dado.

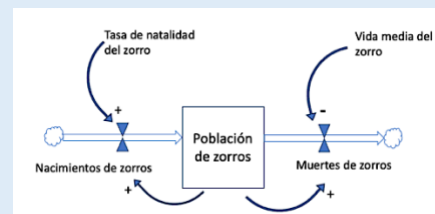
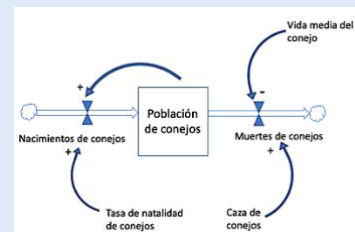
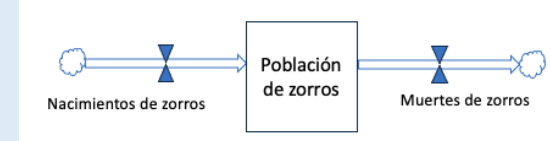
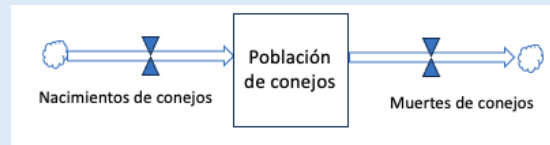
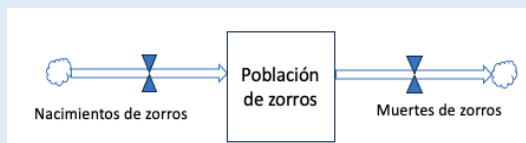
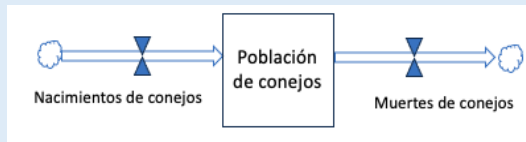
EJEMPLO: Una vez que los bucles de retroalimentación hayan sido identificados, se deben identificar los **stocks** y...



...Flujos

Las variables de "flujo" permiten identificar las tasas de cambio de las variables "stock"

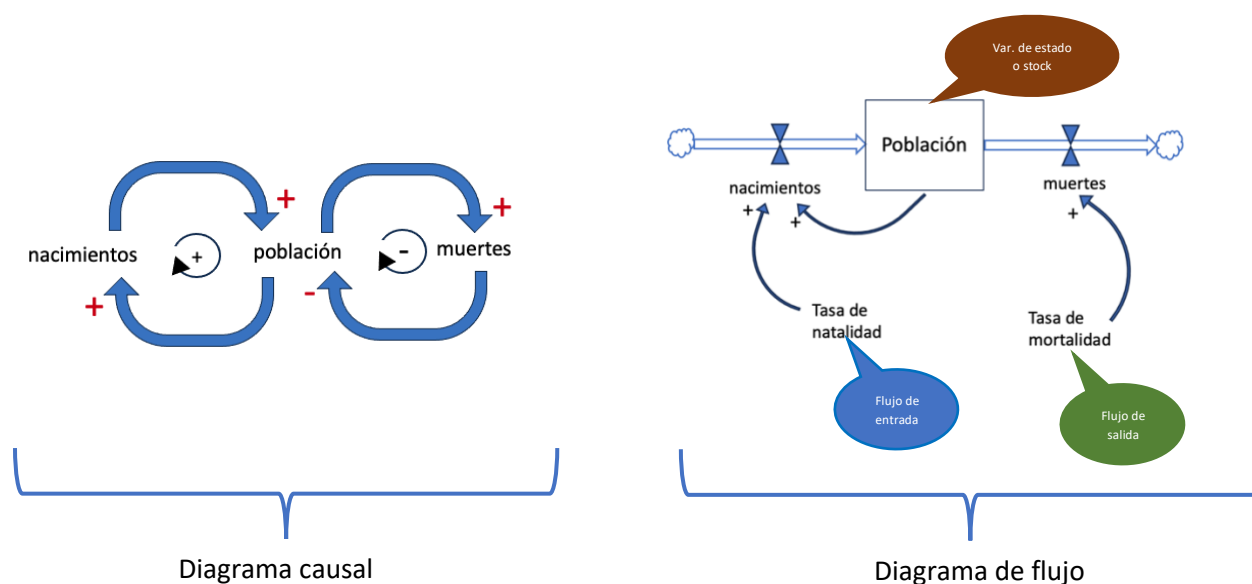
Variables: vida media del zorro - muertes de conejos - tasa de natalidad del zorro - vida media del conejo - necesidades alimenticias del zorro - tasa de natalidad del conejo - población sostenible de conejos



Para desarrollar ecuaciones diferenciales, sigue estos pasos:

Identificación de stocks y flujos: Primero, identifica las principales variables acumulativas o de estado (stocks) y las tasas de cambio (flujos) en tu sistema.

Las **variables de estado (stocks)** representan cantidades acumuladas a lo largo del tiempo, como la cantidad de dinero en una cuenta de banco, la población de una ciudad o la cantidad de agua acumulada en un tanque. Por otro lado, **los flujos** representan las tasas de entrada o salida de un stock, como los depósitos o retiros de dinero, el crecimiento o migración de una población, o el flujo de entrada o salida de un tanque de agua.



Las variables de estado son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen cómo evoluciona un sistema dinámico a lo largo del tiempo. Estas ecuaciones representan las relaciones entre las variables de estado del sistema y cómo estas cambian en función de las **entradas (flujos)** y las condiciones iniciales. Las ecuaciones de estado se escriben típicamente en la forma general:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t)$$

Donde:

x es el vector de estado que contiene las variables de estado del sistema.

u es el vector de entrada que representa las señales de control o las perturbaciones externas.

t es una función que describe cómo evoluciona el estado en función de las entradas o flujos y el tiempo.

3.3. Paso 3. Ecuaciones diferenciales

De tal forma que, las ecuaciones de estado representan las acumulaciones o reservorios en el sistema. A menudo, estas acumulaciones son cantidades que se pueden acumular o agotar con el tiempo, como la población, el capital o la cantidad de recurso en un sistema ecológico. Matemáticamente, las ecuaciones de estado a menudo se representan como ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{dx(t)}{dt} = inflow(t) - outflow(t)$$

Donde $x(t)$ es la cantidad acumulada en el tiempo t , e $inflow$ y $outflow$ son las tasas de flujo entrante y saliente, respectivamente.

Los flujos se basan en la relación entre las variables que afectan ese flujo. Por ejemplo:

$$\text{Flujo} = [\text{Factor de Proporcionalidad}] \times [\text{Variable Dependiente}]$$

Por lo tanto, estas **variables de flujo** determinan las tasas de cambio entre los diferentes estados o acumulaciones. Estos flujos pueden estar influenciados por diversas variables y parámetros del sistema. Un ejemplo clásico es el flujo de natalidad y mortalidad en un modelo de población.

Por ejemplo, en un modelo simple de crecimiento poblacional, el flujo de natalidad podría estar dado por:

$$natalidad = tasa_de_natalidad \times población$$

Y el flujo de mortalidad podría ser:

$$mortalidad = tasa_de_mortalidad \times población$$

La ecuación de estado sería:

$$\frac{dP}{dt} = \underbrace{natalidad}_{\text{Flujo de entrada}} - \underbrace{mortalidad}_{\text{Flujo de salida}}$$

Donde:

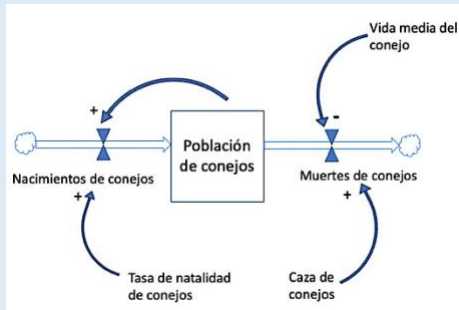
$\frac{dP}{dt}$ representa la tasa de cambio del stock P (población) con respecto al tiempo t

“flujo de entrada” se refiere a la tasa a la que algo (en este ejemplo individuos) entran en el stock

“flujo de salida” se refiere a la tasa a la que algo (en este ejemplo individuos) entran en el stock

En resumen, las ecuaciones de estado describen la dinámica interna de un sistema, mientras que las ecuaciones de flujo describen cómo se relacionan las salidas del sistema con su estado y las entradas. Ambos conjuntos de ecuaciones son esenciales para modelar y analizar sistemas dinámicos en una variedad de campos, como la ingeniería, la física y la biología, la economía, entre otros.

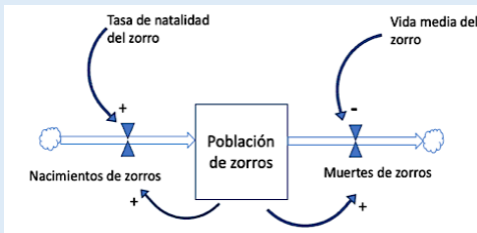
EJEMPLO: Ecuaciones



$$\frac{dx(t)}{dt} = \text{flujo de nacimiento de conejos} - \text{flujo de muertes de conejos}$$

$$\text{flujo de nacimientos de conejos} = (\text{población de conejos})(\text{tasa de natalidad de conejos})$$

$$\text{flujo de muertes de conejos} = \frac{\text{población de conejos}}{\text{vida media del conejo} + \text{caza de conejos}}$$



$$\frac{dx(t)}{dt} = \text{flujo de nacimiento de zorros} - \text{flujo de muertes de zorros}$$

$$\text{flujo de nacimientos de zorros} = (\text{población de zorros})(\text{tasa de natalidad de zorros})$$

$$\text{flujo de muertes de zorros} = \frac{\text{población de zorros}}{\text{vida media del zorro}}$$

4.3. Implementación y especificación del modelo

4. Especificación de parámetros

Asigna valores o rangos a todos los parámetros y coeficientes en tus ecuaciones. Estos valores pueden ser constantes o pueden variar a lo largo del tiempo.



Asegúrate de incluir unidades de medida consistentes y adecuadas (Km, m², m³, No. Individuos, \$, %, etc.)

4.1. Paso 1. Condiciones iniciales

Define las condiciones iniciales del sistema, es decir, los valores iniciales de las variables de estado en el momento en que comienza la simulación.

La dinámica de sistemas es un enfoque para entender el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo. Una parte fundamental de la modelación en la dinámica de sistemas es la definición de las condiciones iniciales, ya que éstas determinan el estado inicial del sistema y tienen un impacto directo en la trayectoria que seguirá el sistema a lo largo del tiempo.

Estas condiciones iniciales son esenciales para comprender cómo evoluciona el sistema a lo largo del tiempo ya que proporcionan el punto de partida para el modelo dinámico y son cruciales para explorar el comportamiento futuro del sistema. Pueden incluir valores iniciales para variables como la cantidad de

existencias de un recurso, la tasa de crecimiento de una población, la cantidad de dinero en circulación, entre otros, dependiendo del contexto del sistema que se esté modelando.



Una vez que hayas identificado las variables de estado, necesitas determinar sus valores iniciales. Esto podría basarse en datos históricos, suposiciones o experimentos. Para ello, la **consistencia** y la **documentación** son indispensables.

Es importante establecer con precisión las condiciones iniciales, ya que pequeñas variaciones en estos valores pueden tener un impacto significativo en las exploraciones a largo plazo del sistema. Las condiciones iniciales suelen derivarse de datos históricos o de información empírica sobre el estado del sistema en el momento en que comienza la simulación.



Consistencia: se refiere al proceso para asegurarse de que las condiciones iniciales sean consistentes con otras partes del modelo y con lo que sabemos sobre el sistema en la realidad.



Documentación: se refiere al proceso crucial de documentar cómo y por qué seleccionaste ciertas condiciones iniciales. Esto ayuda a quienes revisan o usan tu modelo a entender tus elecciones y las bases de tu modelo.

Consideraciones al definir condiciones iniciales:

Datos disponibles: Idealmente, las condiciones iniciales deberían basarse en datos reales o en investigaciones anteriores. Sin embargo, en muchos casos, es posible que no haya datos disponibles y tengas que hacer suposiciones.



Si tienes que hacer **suposiciones**, asegúrate de que sean razonables y defendibles. Es importante también ser transparente sobre estas suposiciones.

En resumen, las condiciones iniciales son la base sobre la cual se construye el modelo dinámico de un sistema, y su correcta especificación es esencial para obtener resultados precisos y significativos al analizar el comportamiento a lo largo del tiempo (ver más detalles en 4.2. Paso 2. Análisis de sensibilidad).

EJEMPLO: Condiciones iniciales y parámetros

Del siguiente planteamiento del problema, identifica las condiciones iniciales y los parámetros

Existe una población sostenible de 500 conejos como la población inicial del sistema. Se reproducen a una tasa de 2 conejos por conejo al año, es decir, nacen 1.000 conejos. La muerte de conejos ha de ser también de 1.000. Con una vida media de 2,5 años mueren 200 conejos al año, y por lo tanto, los zorros cazan 800 conejos. Si cada zorro caza 20 conejos al año, tendremos una población inicial de 40 zorros. Con una vida media del zorro de 4 años van a morir 10 zorros al año, y esta es la misma cifra de los que nazcan, para mantener estable la población de zorros.

a) Para definir las **condiciones iniciales** utiliza las variables de estado como referencia

- población de conejos= 500 [número de conejos]
- población de zorros = 40 [número de zorros]

b) Considera a los **parámetros** como variables exógenas que no pueden ser modificadas:

- vida media del zorro= 4 [años]
- vida media del conejo= 2.5 [años]
- tasa de natalidad del conejo= 2 [número de conejos/conejo]
- población sostenible de conejos=500 [número de conejos]

4.2. Paso 2. Análisis de sensibilidad

Este análisis permite comprender la sensibilidad de un sistema a cambios en diferentes variables y ayuda a identificar cuáles son los factores más influyentes en el comportamiento del sistema.

Es útil realizar análisis de sensibilidad para determinar cómo las variaciones en las condiciones iniciales afectan los resultados del modelo. Si el modelo es altamente sensible a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, esto puede ser una señal de que el modelo necesita más refinamiento o que ciertas condiciones iniciales requieren una mayor precisión.



El proceso de **iteración** es importante en esta etapa dado que a medida que aprendes más sobre el sistema o recibes más datos, puedes necesitar ajustar las condiciones iniciales para reflejar mejor la realidad.

Objetivos del análisis de sensibilidad:

- **Identificación de parámetros relevantes** - Identificar los parámetros del modelo que se consideran críticos o cuyos cambios pueden tener un impacto significativo en los resultados del sistema. Estos pueden incluir tasas de crecimiento, tasas de decrecimiento, tasas de transferencia.
- **Definición de escenarios** - Establecer diferentes escenarios al variar los valores de los parámetros identificados. Por ejemplo, podrías examinar cómo cambian las salidas del modelo cuando se aumenta o disminuye un parámetro específico en un cierto porcentaje (ver detalles sobre la implementación del modelo en sección: 5. Implementación del modelo).

- **Ejecución de simulaciones** - Realizar simulaciones del modelo para cada escenario definido. Utilizar herramientas de simulación para observar cómo evoluciona el sistema en respuesta a las variaciones en los parámetros seleccionados.



Las condiciones iniciales pueden variar dependiendo de la **escala temporal** del modelo. Por ejemplo, un modelo que examina el crecimiento de la población durante décadas tendrá condiciones iniciales diferentes de un modelo que examina el crecimiento diario.

En resumen, definir las condiciones iniciales es un paso crítico en la modelación de la dinámica de sistemas. Estas condiciones iniciales establecen el estado desde el cual el sistema comenzará a evolucionar en el modelo, y una elección cuidadosa y bien fundamentada puede ayudar a garantizar que el modelo proporcione resultados útiles y realistas.

5. Implementación del modelo

Utiliza software de modelado de dinámica de sistemas, como Vensim, Stella, lenguaje de programación (R, R Studio, Python u otro) o cualquier otro software de tu elección, para implementar el modelo. Ingresa las ecuaciones diferenciales y las condiciones iniciales en el software.

Una vez que ejecutaron las simulaciones durante el análisis de sensibilidad (ver sección 4.2. Paso 2. Análisis de sensibilidad), realiza el análisis de los resultados.

Objetivos de la implementación del modelo:

- **Análisis de Resultados** - Evaluar y comparar los resultados de las simulaciones. Identificar patrones y tendencias en cómo las variaciones en los parámetros afectan las variables de interés. Esto puede incluir la observación de umbrales críticos, puntos de inflexión o efectos no lineales.
- **Visualización** - Utilizar gráficos y visualizaciones para representar claramente los cambios en las variables del sistema en relación con las variaciones en los parámetros. Los diagramas de sensibilidad y las curvas de respuesta son herramientas comunes en este contexto.
- **Conclusiones y Recomendaciones** - Derivar conclusiones sobre la importancia relativa de los diferentes parámetros y sus impactos en el sistema. Esto puede informar decisiones estratégicas, ayudar a identificar áreas críticas para intervenciones o ajustes, y mejorar la comprensión general del comportamiento del sistema.

El análisis de sensibilidad se vuelve relevante en esta etapa ya que es una herramienta valiosa para entender la robustez y la vulnerabilidad de los sistemas dinámicos, lo que puede ser fundamental en campos como la gestión empresarial, la ecología, la economía, la ingeniería y muchos otros donde la comprensión de las interconexiones y las respuestas del sistema es esencial.

6. Calibración y validación del modelo

Antes de utilizar el modelo para tomar decisiones importantes, verifica su precisión. Compara las salidas del modelo con datos observados o con el conocimiento de expertos sobre el tema para asegurarte de que el modelo refleja adecuadamente el sistema real.

La calibración en dinámica de sistemas se refiere al proceso de ajustar los parámetros y variables de un modelo dinámico para que reproduzca con precisión el comportamiento observado en el sistema real. Este proceso es esencial para garantizar que el modelo sea una representación fiel de la realidad y pueda utilizarse de manera efectiva para el análisis y la toma de decisiones.



Antes de comenzar con la calibración, es crucial tener claridad sobre los objetivos del modelo y los resultados esperados. Esto implica definir qué aspectos específicos del sistema se pretenden modelar y analizar.

Objetivos de la calibración:

- **Identificación de Parámetros** - Se deben identificar los parámetros del modelo que requieren calibración. Estos pueden incluir tasas de crecimiento, tasas de decrecimiento, coeficientes de interacción, capacidades de almacenamiento de los stocks, consideración de retrasos de información y/o de materiales, entre otros.
- **Recopilación de Datos** - Se recopilan datos del sistema real para utilizarlos como referencia durante el proceso de calibración. Estos datos pueden provenir de observaciones directas, experimentos, o fuentes secundarias confiables.
- **Selección de Métricas de Ajuste** - Se eligen métricas que permitan cuantificar la discrepancia entre el comportamiento observado y el simulado por el modelo. Estas métricas pueden incluir errores absolutos, cuadrados medios, coeficientes de correlación, entre otros.
- **Establecimiento de Criterios de Aceptación** - Se definen criterios que determinarán cuándo el modelo se considera calibrado de manera satisfactoria. Estos criterios están basados en las métricas seleccionadas y suelen establecer umbrales aceptables de error.
- **Ajuste de Parámetros** - Utilizando algoritmos de optimización, se ajustan los parámetros del modelo para minimizar la discrepancia entre las simulaciones del modelo y los datos observados. Este proceso puede implicar iteraciones y la aplicación de técnicas como el **método de gradiente descendente**.



Método de gradiente descendente: El descenso de gradiente es un algoritmo que estima numéricamente dónde una función genera sus valores más bajos. Todo lo que necesita para ejecutarse es la salida numérica de una función, no requiere ninguna fórmula (Khan Academy, 2023).

Para conocer más, revisa la Lección 4: Optimizar funciones multivariables, descenso de gradiente de la Khan Academy.

[https://es.khanacademy.org/math/multivariable-calculus/applications-of-multivariable-derivatives/optimizing-multivariable-functions/a/what-is-gradient-descent#:~:text=El%20descenso%20de%20gradiente%20minimiza,f%20\(%20x%20n%20\)%20%E2%80%8D%20](https://es.khanacademy.org/math/multivariable-calculus/applications-of-multivariable-derivatives/optimizing-multivariable-functions/a/what-is-gradient-descent#:~:text=El%20descenso%20de%20gradiente%20minimiza,f%20(%20x%20n%20)%20%E2%80%8D%20)

La calibración en dinámica de sistemas es un proceso iterativo y requiere experiencia en el dominio del sistema que se está modelando, así como habilidades en estadística y optimización. Un modelo bien calibrado es fundamental para que las simulaciones reflejen de manera precisa el comportamiento del sistema real.



Es crucial **documentar** el proceso de calibración, incluyendo los datos utilizados, los parámetros ajustados, las métricas de evaluación y los resultados obtenidos. Esto proporciona transparencia y permite la replicación por parte de otros



Para aprender más te recomendamos acudir al libro:

Sterman, J. (2000). Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Irwin/McGraw-Hill.

La validación de modelos de dinámica de sistemas es un paso esencial para asegurarse de que el modelo refleja adecuadamente la realidad que se está tratando de representar. La dinámica de sistemas se centra en la simulación de flujos y retroalimentaciones en sistemas complejos, por lo que es especialmente importante asegurarse de que los modelos sean confiables.



¡Ajusta el modelo!

Si el modelo no coincide completamente con los datos reales, ajusta las ecuaciones de flujo y las condiciones iniciales según sea necesario. Este es un proceso iterativo que puede requerir múltiples revisiones del modelo.

Objetivo de la Validación:

El propósito principal es determinar si el modelo es una representación adecuada de la realidad para el propósito previsto. La validación garantiza que las conclusiones derivadas del modelo sean sólidas y confiables.



Documenta todas las **suposiciones**, las fuentes de datos, los métodos de validación utilizados y los resultados. Una buena documentación es esencial para que otros puedan entender, replicar y confiar en el modelo.

La validación no es un proceso único. A medida que se obtengan más datos o se identifiquen deficiencias en el modelo, es posible que necesites revisar y volver a validar (proceso de **iteración**).

Tipos de Validación:

- **Validación estructural** - Se refiere a la correcta representación del sistema real en términos de sus componentes y conexiones.
- **Validación de comportamiento** - Se refiere a la capacidad del modelo para replicar el comportamiento histórico o esperado del sistema.

Pasos para la Validación:

- **Definición de criterios** - Identifica los criterios que se usarán para determinar si el modelo es válido. Esto puede incluir, por ejemplo, error cuadrático medio, correlación entre datos reales y simulados, entre otros.
- **Comparación con datos históricos** - Si hay datos históricos disponibles, compara las salidas del modelo con estos datos para ver cómo se alinean.
- **Validación con expertos** - Involucra a expertos en el campo para que evalúen si el modelo y sus salidas tienen sentido desde una perspectiva de conocimiento experto.

- **Tests de sensibilidad** - Alterna los valores de los parámetros y observa cómo cambian las salidas. Esto puede ayudarte a identificar áreas del modelo que son particularmente sensibles a cambios en los inputs.
- **Tests de robustez** - Introduce perturbaciones en el sistema (por ejemplo, variaciones en las condiciones iniciales) y observa si el modelo sigue comportándose de manera razonable.



Es esencial **reconocer** y comunicar las **limitaciones** del modelo. Ningún modelo es una representación perfecta de la realidad, y es importante que los usuarios del modelo entiendan sus limitaciones.

Con el tiempo, es probable que el sistema real cambie, lo que significa que el modelo también deberá ser **actualizado** y **revalidado**.

La validación es un proceso crucial en la dinámica de sistemas. Asegurarse de que un modelo es una representación adecuada de la realidad es esencial para hacer exploraciones prospectivas y tomar decisiones informadas basadas en ese modelo.

7. Ejemplo numérico básico

La dinámica de sistemas se utiliza para modelar y analizar el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo. Un ejemplo clásico en dinámica de sistemas es el modelo de crecimiento poblacional. Vamos a describir un ejemplo numérico simple utilizando una ecuación diferencial para representar la dinámica de la población.

Supongamos que tenemos una población de conejos y queremos modelar cómo cambia con el tiempo. Podemos usar la **ecuación logística** como modelo de crecimiento poblacional, que tiene la siguiente forma:

$$\frac{dP}{dt} = r * P \left(1 - \frac{P}{K}\right)$$

Donde:

P es la población de conejos.

t es el tiempo

r es la tasa de crecimiento intrínseco

K es la capacidad de carga del entorno (el tamaño máximo que puede alcanzar la población)

Ahora, definiremos algunas **condiciones iniciales** y resolveremos numéricamente la ecuación diferencial. Supongamos que inicialmente hay 100 conejos ($P_0 = 100$), la tasa de crecimiento es $r = 0.1$, y la capacidad de carga es $K = 1000$

Vamos a usar un método numérico simple, como el **método de Euler**, para resolver la ecuación diferencial y ver cómo cambia la población con el tiempo.

Definición de parámetros:

$$P_0 = 100 \text{ (población inicial)}$$

$$r = 0.1 \text{ (tasa de crecimiento intrínseco)}$$

$$K = 1000 \text{ (capacidad de carga)}$$

$$\Delta t = 1 \text{ (intervalo de tiempo)}$$

Ecuación diferencial:

$$\frac{dP}{dt} = 0.1 * P \left(1 - \frac{P}{1000}\right)$$

Método de Euler:

$$P_{n+1} = P_n + \frac{dP}{dt} * \Delta t$$

Iteraciones (por ejemplo, para 10 unidades de tiempo):

$$t = 0: P_0 = 100$$

$$t = 1: P_1 = P_0 + 0.1 \cdot P_0 \cdot \left(1 - \frac{P_0}{1000}\right) \cdot 1$$

$$t = 2: P_2 = P_1 + 0.1 \cdot P_1 \cdot \left(1 - \frac{P_1}{1000}\right) \cdot 1$$

.

.

.

Esto te dará una serie de valores de población a lo largo del tiempo, lo que te permitirá visualizar cómo cambia la población de conejos según el modelo logístico de crecimiento poblacional.

8. Comunicación de los resultados del modelo

Comunicar los resultados de un modelo de dinámica de sistemas es esencial para que otros comprendan las implicaciones y hallazgos de tu trabajo. Aquí tienes un ejemplo de cómo podrías comunicar los resultados:

- **Resumen Ejecutivo** - Comienza con un resumen breve y claro de los resultados más importantes. Destaca las conclusiones clave y las implicaciones prácticas.
- **Descripción del Modelo** - Proporciona una breve descripción del modelo de dinámica de sistemas utilizado. Explica las variables clave y las relaciones entre ellas.
- **Validación del Modelo** - Detalla cómo validaste el modelo para asegurarte de que refleje de manera precisa el sistema que estás estudiando. Menciona cualquier ajuste realizado durante el proceso de validación.
- **Escenarios de Simulación** - Presenta los diferentes escenarios de simulación que ejecutaste. Explica las razones detrás de la elección de cada escenario.
- **Resultados Numéricos** - Proporciona tablas, gráficos y otros resultados numéricos. Utiliza visualizaciones efectivas para destacar tendencias y patrones.
- **Análisis de Sensibilidad** - Incluye un análisis de sensibilidad para identificar las variables que más influyen en los resultados. Discute las implicaciones de estas variables clave.
- **Conclusiones** - Resume las conclusiones principales derivadas de los resultados. Destaca cualquier sorpresa o hallazgo inesperado.
- **Limitaciones del Modelo** - Reconoce las limitaciones de tu modelo y cualquier suposición simplificadora que hayas hecho. Discute cómo estas limitaciones podrían afectar la interpretación de los resultados.
- **Recomendaciones** - Proporciona recomendaciones basadas en los resultados. Sugerir posibles ajustes o mejoras en el sistema basados en tus hallazgos.
- **Apéndices** - Incluye cualquier detalle técnico adicional en los apéndices para aquellos que deseen explorar más a fondo tu trabajo.



Recuerda adaptar tu comunicación según tu audiencia. Asegúrate de que tu informe sea claro, accesible y relevante para aquellos que puedan estar utilizando o tomando decisiones basadas en tus resultados.

- **Mantenimiento y actualización** - Los sistemas cambian con el tiempo, por lo que es importante mantener y actualizar tu modelo a medida que obtengas nuevos datos o cambien las condiciones del sistema.

5. Recomendaciones finales

- Recuerda que desarrollar un modelo de dinámica de sistemas es un proceso continuo y que la práctica y la experiencia son clave para mejorar la precisión y la utilidad de tus modelos.
- Usa el modelo como herramienta de aprendizaje: Más allá de predecir, la dinámica de sistemas es poderosa para aprender sobre sistemas complejos.
- Recuerda que el objetivo principal de modelar sistemas dinámicos es obtener una mejor comprensión del sistema en estudio, identificar puntos de intervención, y anticipar comportamientos futuros bajo diferentes condiciones.



Para modelar **sistemas económicos** te sugerimos el libro: Ruth, M., B. Hannon 1997. Modeling Dynamic Economic Systems. Springer. ISBN 0-387-94849-X

6. Bibliografía

Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers, Harvard business review, 36(4), 37-66.

Meadows, D. H., Meadows, D. L. Randers, J., Behrens III, W. W. (1972). The Limits to Growth. Potomac Associates - Universe Books.

Meadows, D.; Randers, J.; Meadows, D. (2004). Limits To Growth: The 30-Year Update (Paperback ed.). Chelsea Green Publishing. [ISBN 193149858X](#).

Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.

7. Ejercicio

Diagrama causal y de flujo: Estructura y comportamiento de sistemas dinámicos

Conejos y Zorros

1. Descripción del problema

Este ejercicio captura la dinámica de dos poblaciones típicas de depredador-presa, que puede servir para analizar problema del tipo *“la población de conejos tiene importantes oscilaciones que queremos reducir”*. Una investigación previa nos señala como causantes de estas oscilaciones a los zorros, y hacemos una lista de los elementos que se relacionan con el problema, del tipo: - *población de conejos* - *nacimientos de zorros* - *población de zorros* - *defunciones de zorros* - *nacimientos de conejos* - *vida media del zorro* - *muerdes de conejos* - *tasa de natalidad del zorro* - *vida media del conejo* - *necesidades alimenticias del zorro* - *tasa de natalidad del conejo* - *población sostenible de conejos*

Una forma de identificar los *stocks o variables de estado* de un sistema suele ser hacer una fotografía mental del sistema, y asignar la característica de **STOCK** a aquellos elementos que aparecen en la imagen. En este caso tendríamos como **STOCKS** a las poblaciones de Conejos y Zorros. Los **FLUJOS** son las variaciones temporales de los STOCKS, y aquí vamos a considerar los nacimientos y muertes tanto de conejos como de zorros. El resto de los elementos son variables auxiliares

2. Desarrollo del modelo

2.1. Requerimientos

Conocimiento básico de Rproject/RStudio, contar con la consola instalada en la computadora

<https://www.r-project.org/>

Descarga del software Vensim® (versión de prueba)

<https://vensim.com/free-downloads/>

2.2. Descripción de variables y parámetros

Los datos con los que disponemos corresponden con información de investigación previa de fuentes secundarias (literatura), nuestra experiencia, o un estudio específico realizado y son los siguientes:

Existe una población sostenible de 500 conejos como la población inicial del sistema. Se reproducen a una tasa de 2 conejos por conejo al año, es decir, nacen 1.000 conejos. La muerte de conejos ha de ser también de 1.000 conejos para mantener el equilibrio (recordar que el modelo debe partir del equilibrio para poder analizar el efecto de cambios o perturbaciones, (elemento 5)). Con una vida media de 2,5 años mueren 200 conejos al año, y por lo tanto los zorros cazan 800 conejos. Si cada zorro caza 20 conejos al año, tendremos una población inicial de 40 zorros. Con una vida media del zorro de 4 años van a morir 10 zorros al año, y esta es la misma cifra de los que nazcan, para mantener estable la población de zorros.

2.3. Nota importante

En un contexto “real” no todas las variables de un problema son explícitas (como las mencionadas en 1. Descripción del problema). En muchas ocasiones tenemos que **construir** esas **variables**. En este ejercicio deberás construir una variable importante:

- Revisa que existe una variable que no se había contemplado en el enunciado del problema y que se construye con las variables ya definidas en el enunciado. Esta variable es: POBLACIÓN RELATIVA
- Especifica POBLACIÓN RELATIVA en el script de R

3. Instrucciones para el/la alumno/a

1. Elaborar un diagrama causal empleando las variables identificadas y que explican el problema. Para elaborar el diagrama causal se sugiere el uso del software Vensim® (versión de prueba).
2. Desarrolla el diagrama de flujo. Para elaborar el diagrama de flujo se sugiere el uso del software Vensim®. Las variables de este diagrama se encuentran en la descripción del problema señaladas con letras cursivas.
3. Especifica las ecuaciones diferenciales usando la plantilla en R (Anexo 2)
4. Escribe las ecuaciones que describen el modelo. Emplea notación matemática
5. Diseña el modelo para que reproduzca una situación estable de las poblaciones y después simula en una prueba el efecto de un pequeño cambio o perturbación en alguna de las variables, en concreto en los nacimientos de conejos. Aquí podrás ver con claridad si la estructura del sistema amortigua, o amplifica este pequeño cambio, o bien si se crean oscilaciones.
6. Analiza el comportamiento que genera el modelo cuando se produce un incremento del 10% en los nacimientos de conejos, partiendo de una situación de equilibrio.
7. ¿Bajo qué circunstancias (población de zorros y conejos) podríamos alcanzar una trayectoria sostenible de ambas poblaciones?
8. ¿Bajo qué circunstancias (valores en los parámetros) la población de conejos colapsa?
9. ¿Bajo qué circunstancias (valores en los parámetros) la población de zorros colapsa?

4. Recomendaciones para el/la profesor/a

1. Se sugiere que los alumnos trabajen en equipos
2. Revisa el desarrollo del diagrama de flujo con el proporcionado aquí (Anexo 1)
3. Proporciona a los alumnos la plantilla en R (Anexo 2 <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/6357>) para desarrollar el modelo usando las variables (1. Descripción del problema) y sus parámetros (2.2. Descripción de variables y parámetros).
4. **Entrega 1.** Solicita a los alumnos elaborar una presentación donde identifiquen desafíos en el desarrollo del modelo y propuestas para mejorarlo. Utiliza el modelo ya desarrollado en R (Anexo 3 <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/6357>) para comparar y dar retroalimentación los alumnos. Recuerda que existen varias formas de desarrollar un modelo de dinámica de sistemas, es posible que algunos alumnos logren plantear el problema y llegar a los mismos resultados (o resultados muy similares) con un planteamiento distinto al que se proporciona en el Anexo 3. Revisa con los alumnos la coherencia de lo que plantean.
5. **Entrega 2.** Solicita a los alumnos elaborar una presentación con la siguiente estructura: a) planteamiento del problema; b) Principales hallazgos (puntos 5 a 9); c) Conclusiones.

Anexo 1. Diagrama de flujo. Construcción de la variable no explícita (población relativa)

