

Aprendiendo sobre sistemas complejos mediante el modelado y la simulación

Learning about complex systems with system dynamics

3



*Martin Schaffernicht
Universidad de Talca (Chile)
martin@utalca.cl*

Resumen— Este artículo presenta los dos procesos cíclicos que la dinámica de sistemas propone para aprender cómo es un sistema dinámicamente complejo y cómo se comporta. Se revisan los fundamentos de la disciplina y se ponen en el contexto del aprendizaje-acción. Luego se conceptualizan los procesos mencionados y se introducen dos falencias cognitivas típicas; una de ellas se usa para un ejemplo práctico. Se concluye enunciando el área de investigación de la medición del aprendizaje.

Palabras Clave— Sistema complejo, aprendizaje, dinámica de sistemas

Abstract— This article deals with the two learning loops used by system dynamics to learn how a dynamic system is and how it behaves. Basic concepts are briefly introduced and put into the context of action learning. The two loops are discussed in several application settings. Then two typical cognitive shortcomings are introduced and a practical example is explained. In closing, a brief outlook is offered on the research theme of measuring learning.

Keywords— Complex system, learning, system dynamic

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es introducir al lector en los conceptos y los procesos que subyacen al uso de la dinámica de sistemas en general y en un contexto educacional en particular. La dinámica de sistemas (DS) se desarrolló originalmente con el propósito de permitir a tomadores de decisión usar un enfoque similar a la ingeniería (basado en pruebas) al diseño de políticas de decisión. Después de una serie de desarrollos en diversos campos como la industria, las ciudades y el sistema mundial, se estableció el nombre dinámica de "sistemas" ([6],[7],[8],[9]).

No obstante su uso en el mundo del trabajo, desde los años '80 la instrucción de la DS se expandió de las universidades hacia los colegios. Al mismo tiempo, en México y Colombia se inició su uso y la formación. En la actualidad, la Sociedad de Dinámica de Sistemas tiene un Capítulo Latinoamericano y otro Brasileño y la DS se usa en la educación universitaria en la mayoría de los países del subcontinente.

La DS puede ser entendida como una disciplina metodológica que se estudia por sí misma, pero también permite estudiar problemas relevantes en un gran número de campos de aplicación, como la administración, el gobierno, la ecología – en breve, las situaciones que cambian en el tiempo, que nos complican la vida con efectos secundarios indeseados y que nos vuelven a plantear nuevos problemas vez tras vez. Hay entonces una oportunidad importante para muchas disciplinas.

Para permitir ver este potencial, este artículo procederá en los siguientes pasos. Algunos de los conceptos básicos

y algunas premisas se introducirán en la segunda sección. Luego, la tercera sección, se establece la relación con el campo de la docencia. En términos de herramienta para la enseñanza, la DS puede ser colocada en el contexto del aprendizaje-acción o aprendizaje por descubrimiento. Siguiendo esta pista, se aprecia el carácter cíclico de este enfoque y se introduce el proceso cíclico de la DS, consintiendo en un bucle de estructuración de problemas y otro de implicancias dinámicas.

Si bien la DS es una herramienta poderosa, no es un instrumento todopoderoso; su aplicación es particularmente recomendable en situaciones donde el razonamiento intuitivo falla sistemáticamente. La cuarta sección presenta las dos fallas más investigadas y permite hacer un ejemplo ilustrativo del proceso. La quinta y última sección plantea resumidamente la temática de la medición del aprendizaje, actualmente bajo intensa investigación.

II. FUNDAMENTOS PARA DINÁMICA DE SISTEMAS

Para Jay Forrester, hay una serie de principios que subyacen el diseño de políticas de decisión en un sistema social ([8]). Si bien una revisión exhaustiva no tiene espacio en este artículo, es importante destacar tres de estas ideas rectoras:

- a) Los sistemas sociales operan en base a retroalimentación y su dinámica engaña la intuición humana;
- b) Los modelos mentales de los propietarios de un problema contienen los elementos para modelar;



c) La confrontación con un modelo de simulación permite mejorar los modelos mentales.

En un sistema social, siempre hay actores con metas que observan las condiciones en su área de acción o responsabilidad y actúan de manera a acercar estas condiciones a las metas. De allí la idea del bucle de retroalimentación: el actor decide en respuesta a una condición y luego actúa para cambiarla. Esta causalidad circular le confiere su complejidad dinámica a tales sistemas y excede lo que el razonamiento intuitivo pueda controlar.

No obstante dicha complejidad, muchas políticas de decisión se toman sin una etapa previa comparable al “canal a viento” usual de la ingeniería – lo que motivó Forrester a desarrollar un enfoque de simulación capaz de soportar la prueba previa de tales políticas ([11]).

El modelado genera y usa modelos que intentan captar lo relevante de un problema mediante tres niveles de representación. Si bien el componente básico de tales construcciones es el bucle de retroalimentación, cada tal bucle consiste de componentes elementales: variables y vínculos causales. Hay diferentes tipos de variable: los acumuladores representan el estado de un aspecto del problema en un determinado momento y los flujos representan los cambios de un acumulador. Adicionalmente se usan variables auxiliares para descomponer procesos complejos en partes más simples. Los otros elementos son los vínculos causales, donde distinguimos los de polaridad positiva y negativa; adicionalmente se pueden marcar como “demora” para designar la especial lentitud de un vínculo.

Así es que cada bucle de retroalimentación emerge de un conjunto de tales elementos. Los elementos son variables de diferentes tipos y vínculos causales. Un acumulador representa el estado de un aspecto del sistema en un determinado instante; un flujo representa la tasa de cambio de un acumulador, y las auxiliares sirven para descomponer razonamientos complejos en partes más simples. A su vez, diferentes bucles se combinan para conformar un sistema que representa el problema entero. Por ejemplo, hasta en el modelo de población más elemental hay un bucle de nacimientos (que agrega individuos) y otro bucle de muertes (que quita individuos): ambos actúan simultáneamente sobre la población.

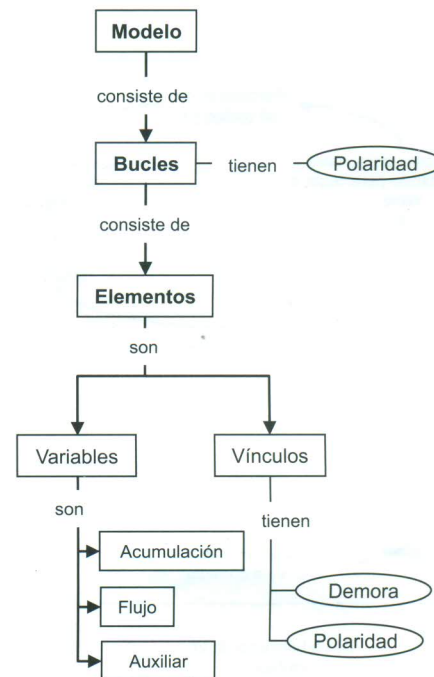


Figura 1.- Niveles de descripción de un modelo de DS

Si el propósito fue de proveer un “compañero permanente para la reflexión” que no produce modelos sino como “imagen momentánea de la comprensión” en búsqueda de mejorar los modelos mentales, la DS era predestinada a ser usada en contextos educacionales, lo que se describe en la sección siguiente.

III. APRENDIZAJE ENTRE ACCIÓN Y REFLEXIÓN

Que el aprendizaje se genera mediante la iteración de acción y reflexión, es una idea que ya tiene tradición a lo menos desde John Dewey desde el inicio del siglo XX ([5]); más tarde, otros han propuesto otros modelos ([13],[14]).

Para Dewey, era importante diferenciar entre el descubrimiento de lo que es el problema y el descubrimiento de lo que puede ser una solución. Lewin hizo una diferencia similar entre lo que es la pregunta y lo que es la respuesta. Ambos autores habían preparado así el terreno para la conceptualización del aprendizaje de diferentes ordenes – pero que escapa al presente artículo.

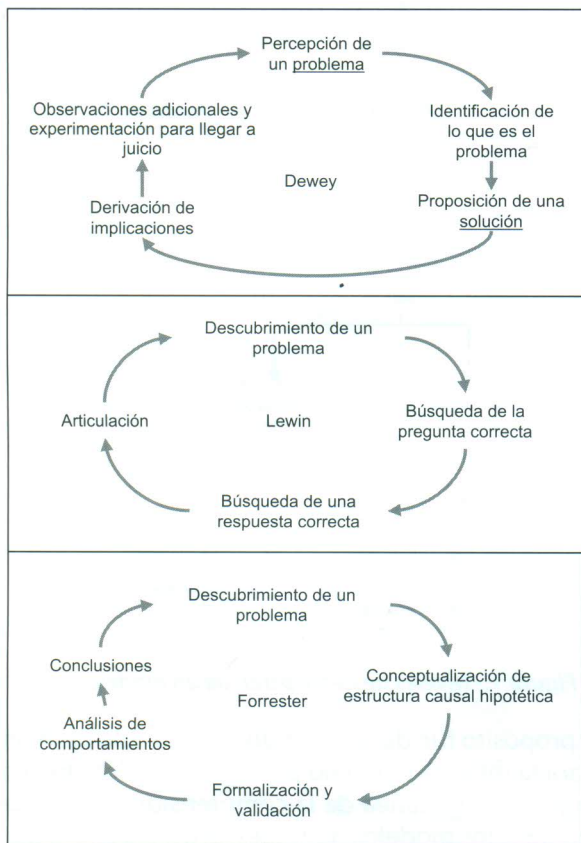


Figura 2.- Ciclos de aprendizaje

Quizás a primera vista, el esquema circular de Forrester no deja ver estos dos niveles: aparentemente el problema simplemente se descubre y luego se diseña una solución. Sin embargo, el nivel de cómo comprender cuál es de verdad el problema es parte integral de la metodología de la DS, como se mostrará a continuación.

En este sentido, si bien la DS no fue concebida con estos ciclos en mente, la similitud es evidente. Pero también existe una eminente cercanía entre el proceso de modelado ([15]) y el ciclo de trabajo en el campo del aprendizaje basado en descubrimiento ([18]):

El proceso de modelado de la DS genera aprendizaje por dos ciclos:

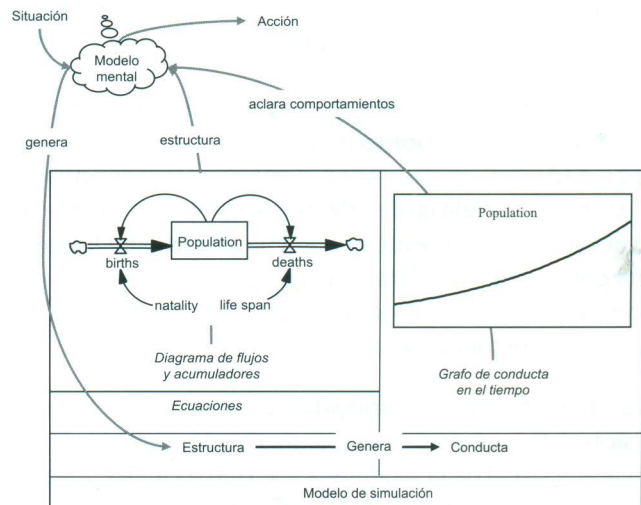


Figura 3.- Ciclos de aprendizaje de estructura y de comportamiento

El primer bucle sirve para la estructuración del problema: después de haber definido la meta del esfuerzo de modelado, se genera un diagrama que mapea todo lo que se presume relevante acerca del problema bajo estudio. Así se genera una imagen "holística" que refleja el conjunto de las idas o modelos mentales. Pero si bien esto permite visualizar la totalidad de las estructuras causales que pueden ser importantes, no permite conocer el comportamiento del sistema así estructurado.

El segundo bucle consiste en simulación y análisis: cuando el computador ejecuta un modelo de simulación, genera los comportamientos que son el resultado lógico de la estructura causal. Esto permite descubrir discrepancias entre el modelo mental y el modelo de simulación y permite identificar y corregir ideas equivocadas, conduciendo a un modelo mental comprobadamente útil para resolver el problema estudiado.

La figura siguiente ilustra la naturaleza iterativa de este proceso, representando la conversión paso a paso de una situación percibida en un plan de acción para cambiar la situación.

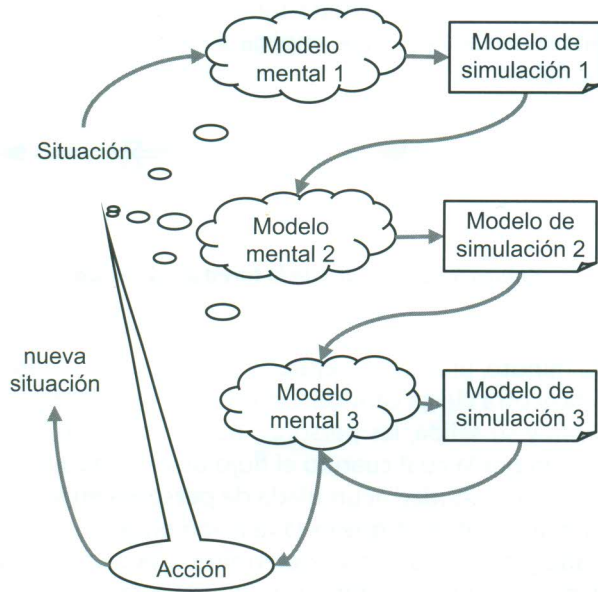


Figura 3.- Proceso completo del modelado en DS

Las primeras ideas acerca de lo que es el problema, suelen llevar al descubrimiento de "sorpresas": no funcionan y el modelador debe reconocer que aún no comprende bien la situación. Es así que la DS puede ser visto como un proceso de aprendizaje de segundo orden ([10]).

Desde los años '60, la experiencia que este proceso permitió adquirir a modeladores, ha sido versada en libros que permitieron a lectores "serios" replicar los pasos esenciales del proceso y llegar a los mismos aprendizajes ("insights"):

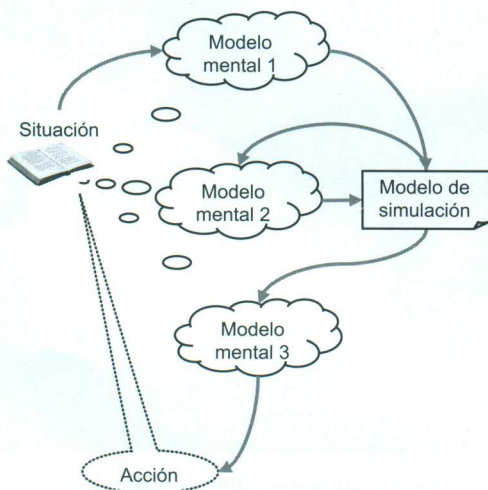


Figura 4.- Redescubriendo con un libro

Con el surgimiento de los software con interfaz de manipulación directa, los llamados "ambientes interactivos de aprendizaje" se han propuesto para permitir aprendizajes por "re-descubrimiento" similares, quizás con menos tiempo invertido:

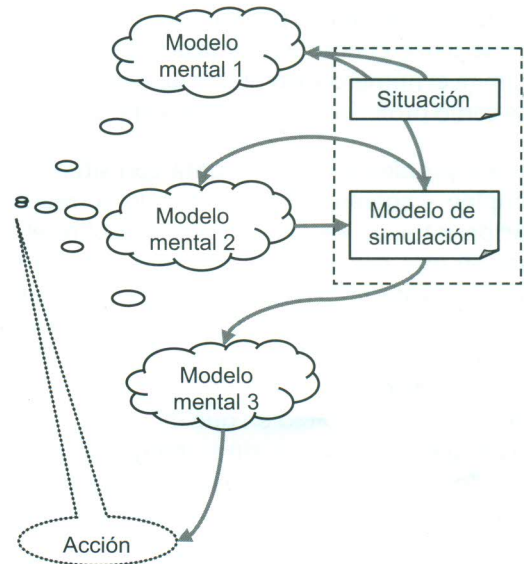


Figura 5.- Redescubriendo con un ambiente interactivo

Ahora bien, la DS no es un arma a superar todo tipo de situación; más bien, se presta bien para enfrentar problemas dinámicos (donde el problema cambia mientras y porque uno intenta resolverlo) por la existencia de ciertas limitaciones cognitivas que nos caracterizan, como lo discute la próxima sección.

IV. FALLAS TÍPICAS DEL RAZONAMIENTO HUMANO

Durante aproximadamente las pasadas dos décadas, diversos investigadores alrededor del mundo han corroborado la existencia de dos fallas o limitaciones cognitivas de los seres humanos:

- no percibimos la circularidad causal cuando interactuamos con situaciones dominadas por bucles de retroalimentación;
- no comprendemos intuitivamente la naturaleza acumulativa de los procesos.

El primer problema recibió el nombre “falta de percibir la retroalimentación” desde un artículo muy influyente de Stermán ([19]). Un ejemplo de esto es el experimento de los renos de Moxnes ([16]) donde se trata de controlar el tamaño de un rebaño de renos (que comen líquen) de manera a evitar que el líquen se extermine (lo que conduciría a la muerte de los renos por hambre). En esta situación, habría que darse cuenta que la tasa de regeneración del líquen limita el número sustentable de renos; sin embargo, novatos como profesionales fallan en esta tarea.

El segundo problema nos confronta con situaciones aún más simples – aparentemente – donde se requiere una apreciación intuitiva de la acumulación sobre el tiempo. La situación más conocida en este sentido es la tarea de la tienda por departamentos, donde se nos presenta la línea de comportamiento de las personas que entran en una tienda y que salen de la tienda, registrado por minutos durante un lapso de media hora. La mayoría de personas puede determinar sin dificultad en qué minuto entro o salio la mayor cantidad de personas; sin embargo, más de la mitad falla cuando debe indicar en qué minuto estuvo la mayor cantidad de personas en la tienda ([2], [3], [4]).

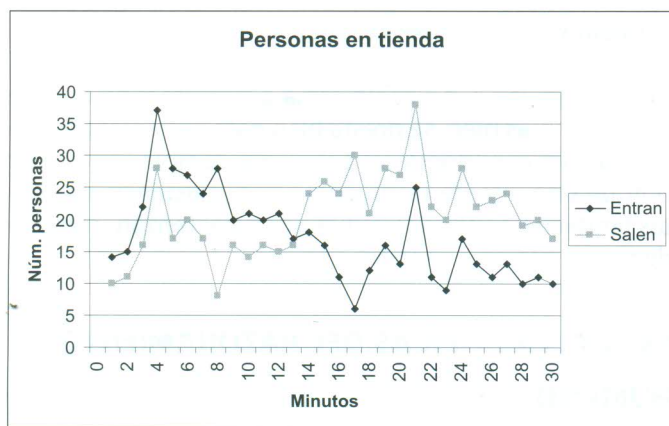


Figura 6.- La tarea de la tienda

Intuitivamente creemos que la mayor cantidad de personas está en la tienda en el minuto 8, porque la diferencia “entran – salen” es particularmente grande. Sin embargo, deberíamos pensar que hasta el minuto 14, siempre entran más personas de los que salen, por lo cual hasta este minuto no deja de aumentar el número de personas en la tienda. Esta falta de percibir la naturaleza acumulativa de la situación es muy “humana”, pero llama a una corrección.

La tarea de la tienda de departamentos se presta para un primer modelado, ya que implica sólo una acumulación y dos flujos:

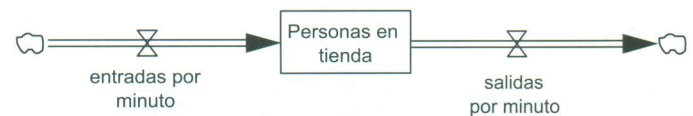


Figura 6.- Estructura de la tarea de la tienda

Cada minuto, una cierta cantidad de personas entran a la tienda, y otra cierta cantidad salen de la tienda. Entre su entrada y su salida, las personas permanecen en la tienda, razón por la cual cuando el flujo de entrada supera al de salida, la cantidad acumulada de personas en la tienda aumenta. Se aprecia que es la relación entre los flujos de entrada y de salida la que determina si la cantidad acumulada aumenta o disminuye (o queda estable).

Después de haber guiado los estudiantes a través de los pasos para diagramar, cuantificar, simular y analizar, queda bien aceptada la lección de que el acumulador representa el resultado acumulativo de todos los sucesos anteriores. Luego se presenta una parte de la película “Una verdad incómoda” a los estudiantes, cuando Al Gore muestra que – con algo de esfuerzo – las emisiones de CO₂ podrían luego reducirse:

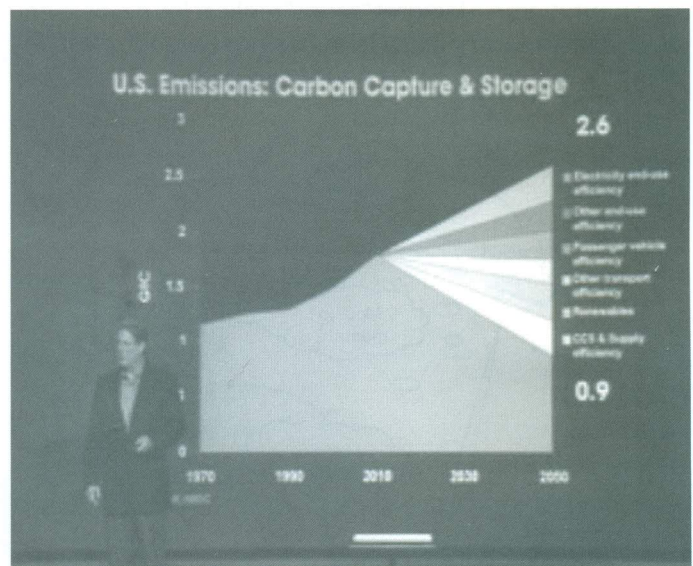


Figura 7.- La reducción de emisiones como solución al problema del CO₂



El mensaje de la película en esta parte es optimista, dejando entender que es posible superar este problema – cosa que analizamos con los estudiantes. La situación de la emisión de CO₂ a la atmósfera, su absorción (por océanos y bosques) también puede ser representada como modelo de DS:

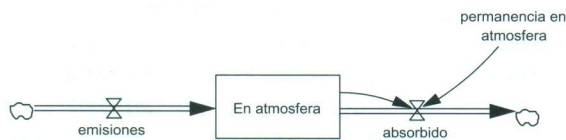


Figura 8.- La estructura del problema del CO₂

La similitud estructural con la tarea de la tienda es fuerte: cada año, una determinada cantidad de emisiones entra en la atmósfera; otra cantidad sale de ella por ser absorbida; el tiempo que el CO₂ permanece en la atmósfera es aproximadamente 40 años. Se simula sobre un periodo de 200 años, asumiendo que las emisiones seguirán sufriendo por 20 años y luego disminuirán.

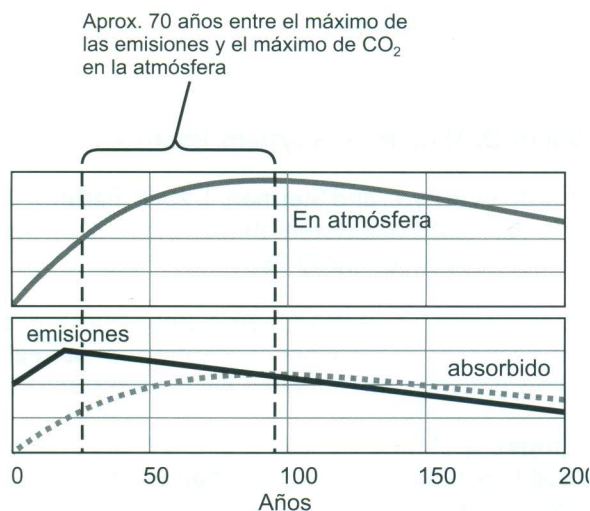


Figura 9.- La reducción de CO₂ no sucede inmediatamente

La simulación revela una sorpresa incómoda: la reducción del CO₂ en la atmósfera no empieza antes de 70 años después del inicio de la reducción de las emisiones. La razón es que entre emisión y absorción pasan 40 años, por lo cual la absorción aumenta con una demora larga. Recordando la regla que “entrada – salida” es lo que determina si la acumulación aumenta, disminuye o permanece, se aclara que el optimismo de la película es exagerado.

Ya que la gran mayoría de personas conocen la película y tienen una conexión afectiva con la problemática del cambio climático, este ejercicio deja una impresión fuerte con estudiantes de pregrado y de postgrado: la “complejidad dinámica” nos engaña fácilmente. Un segundo mensaje, no menor es que lo relevante de situaciones aparentemente muy diferentes – la tarea de la tienda y el problema del CO₂ – son casi las mismas y obedecen a reglas claras, que se pueden usar para mejorar nuestra comprensión (y posterior acción).

En el caso de la Universidad de Talca (Chile), todos los estudiantes de primer año participan de cursos especiales llamados “formación fundamental”, uno de los cuales se dedica a “metodologías para el aprendizaje autónomo”; el ejercicio descrito – junto con otros – forman parte de este curso desde al año 2010 (más material puede ser encontrado y descargado desde <http://dinamicasistemas.ugal.cl>). Si bien esto no es un curso entero de dinámica de sistemas, expone los estudiantes de las diferentes carreras al hecho que frecuentemente “somos todos tan limitados, que creemos siempre tener razón” (como decía Goethe), pero que podemos ayudarnos con enfoques como la DS. Esto nos deja con la necesidad de enunciar el tema de la medición.

IV. MEDICIÓN DEL APRENDIZAJE

Las afirmaciones acerca del aprendizaje causado por la práctica de la DS no se apoyan sólo en evidencia anecdótica o impresiones, sino que se pueden medir de forma objetiva. Diferentes vías están actualmente bajo desarrollo. Cuál que sea la forma detallada de medir, se trata de detectar lo que el sujeto comprende (la estructura), qué implicancias de comportamiento logra extraer de esta estructura y qué tan exitoso es la actuación que sigue.

El término “modelo mental”, que ha sido usado en DS desde el texto fundacional (Forrester, 1961), es también usado en psicología donde se investiga cómo los sujetos representan mentalmente la estructura de un problema. Consecuentemente, en DS se han usado diferentes enfoques de “modelo mental” para articular lo que un sujeto comprende, compararlo (pre y post intervención) e inferir lo que se ha aprendido. Una definición de “modelo mental” para sistemas dinámicos y una adaptación de métodos de comparación de modelos mentales a las necesidades de nuestros tres niveles de representación (elementos, bucles, modelo entero) se encuentra actualmente en desarrollo ([17], [12]).

La definición contempla explícitamente los tres niveles (comparar con Figura 1) y el método calcula una "razón de distancia" al nivel de los elementos, para cada bucle y para el modelo entero. La distancia expresa la importancia de las diferencias que hay entre dos modelos: ¿tienen las mismas variables, los mismos vínculos causales? ¿Qué tan comparables son los bucles uno por uno y como conjunto (el modelo)?

No obstante, hasta este momento cada avance en estos métodos ha significado el descubrimiento de más preguntas nuevas, y se debe esperar una cierta variedad y debate para los próximos años.

No obstante el carácter sumario de esta sección (una presentación en extenso excedería el marco de este artículo), es importante constatar que la posibilidad de incorporar ejercicios de DS y eventualmente cursos de formación en DS en las universidades, constituye un cambio delicado, cuya justificación descansa en la posibilidad de demostrar objetivamente los efectos (y las ventajas).

VI. CONCLUSIONES

Este artículo se planteó la tarea de introducir el lector sumariamente a los fundamentos de la dinámica de sistemas (DS) y luego mostrar cómo y por qué genera aprendizajes que son relevantes para la educación superior.

Bajo la premisa que la mayoría de las situaciones que causal problemas se basan en relaciones causales circulares y que necesitamos una especie de "canal de viento" para probar nuestras ideas de solución, se ha definido un modelo de DS como un conjunto de variables y vínculos causales que conforman bucles de retroalimentación, que a su vez conforman el modelo de la situación.

El proceso de modelado y simulación se presentó como un ciclo de aprendizaje-acción, donde el practicante es llevado a estructurar su comprensión de la situación y confrontar sus ideas con el modelo de simulación hasta haber identificado y corregido los errores importantes.

Se ha explicado que la DS ayuda especialmente donde el razonamiento humano falla: detectar la presencia de bucles de retroalimentación y tomar en cuenta la naturaleza acumulativa de los procesos. Para lo segundo, un ejemplo ilustró no sólo que estas fallas son muy difundidas, pero también que pueden ser corregidas mediante un mode-

lado simple, que además puede ser transferido a otros problemas con estructura causal similar.

Se ha enunciado también que la temática de la medición del aprendizaje es un campo en desarrollo

No obstante, hasta este momento cada avance en estos métodos ha significado el descubrimiento de más preguntas nuevas, y se debe esperar una cierta variedad y debate para los años por venir. Poder generar evidencias comparables y reproducibles es importante para la integración responsable de la DS en diversas áreas de estudio universitarias.

A condición de poder avanzar en este sentido, la DS podrá progresivamente permitir a las carreras de ciencias sociales enriquecerse al incorporar este "canal a viento" para el diseño de políticas de decisión. – cosa de responder a un mensaje que nos dejó David Bohm ([1]: "nuestro pensamiento crea el mundo y luego dice 'no fui yo'").

VII. REFERENCIAS

- [1] Bohm, D., *Thought as a System*, Routledge, 1994
- [2] Booth-Sweeny, L. and Sterman, J. 2000. Bathtub dynamics: initial results of a system thinking inventory, *System Dynamics Review* 16(4): 249-286
- [3] Booth-Sweeny, L. and Sterman, J. 2007. Thinking about systems: student and teacher conceptions of natural and social systems, *System Dynamics Review* 23(2/3): 285-311
- [4] Cronin, M. A. and Gonzalez, C. 2007. Understanding the building blocks of system dynamics, *System Dynamics Review* 23(1): 1 – 17
- [5] Dewey, J., 1991. *How we think*, Prometheus Books
- [6] Forrester, J., 1961. *Industrial dynamics*, MIT Press
- [7] Forrester, J. 1968. *Urban dynamics*, MIT Press
- [8] Forrester, J., 1969. *Principles of systems*, MIT Press
- [9] Forrester, J. 1972. *World Dynamics*. Productivity Press
- [10] Forrester, J. 1985. The "model versus a modeling process", *System Dynamics Review* 1(2): 133-134



[11] Forrester, J. 2007. System dynamics – the next 50 years. *System Dynamics Review* 23(2/3): 359–370

[12] Groesser, S. and Schaffernicht, M., 2011. Mental Models of Dynamic Systems: Taking Stock and Looking ahead, con Stefan Groesser, *System Dynamics Review*, (in press)

[13] Kolb, D., 1984. *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Prentice Hall

[14] Lewin, K., 1951. *Field Theory in Social Sciences*, Harper & Row

[15] Mass, N., 1991. Diagnosing surprise model behavior: a tool for evolving behavioral and policy insights, *System Dynamics Review* 7(1): 68-86

[16] Moxnes, E. Misperception of basic dynamics: the case of renewable resource management, *System Dynamics Review* 20(2): 139–162

[17] Schaffernicht, M. and Groesser, S. 2011. A Comprehensive Method for Comparing Mental Models of Dynamic Systems, *European Journal of Operational Research* 210(1): 57-67

[18] Schaffernicht, M. 2010. Learning from rediscovering system dynamics models, *Systèmes d'Information et Management* 14(4): 87-105

[19] Sterman, J. 1989. Modeling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science* 35(3): 321-339