


# La Universidad interviene

en los debates nacionales

\*\*\*

## **Sistemas complejos: una herramienta para abordar problemas inesperados**

Miguel Virasoro y Fernando Momo



La Universidad Nacional de General Sarmiento cumple 20 años y lo festeja ofreciendo a los lectores de Página/12 otras tantas contribuciones de sus investigadores-docentes para pensar los problemas nacionales.



# Sistemas complejos: una herramienta para abordar problemas inesperados

Miguel Virasoro y Fernando Momo

Investigadores-docentes de la UNGS

A fines de la década de 1960, en un pueblo de la provincia de Buenos Aires, cerca de Luján, se instalaba una industria nueva en la zona. Una curtiembre pequeña capaz de procesar alrededor de seiscientos cueros por día.

La idea de radicarse allí era razonable: el río Luján estaba cerca y se podían volcar en él los efluentes. La materia prima se producía en la zona, que ya era industrial y, de hecho, la fábrica se ubicó muy cerca de una gran empresa textil preexistente. Tan cerca estaba que hacia fines de los setenta los responsables de la curtiembre comenzaron a utilizar el “zanjón” de la textil para arrojar sus propios efluentes al río. Claro que los líquidos arrojados eran un poco más olorosos, caudalosos y tóxicos.

La textil inició una batalla legal contra la curtiembre para que no usara su canal y, como consecuencia de esa escaramuza, se realizaron los primeros análisis químicos del efluente de la curtiembre, descubriendo cantidades elevadas de cromo, sulfuros y otras sustancias igualmente tóxicas. Aun así, como otras mediciones no mostraban signos evidentes de contaminación en las aguas del río, el problema no pasó al dominio público.

La curtiembre se trasladó, se modernizó un poco y se agrandó. Comenzó a procesar muchos más cueros, a utilizar más cantidad de agua en el proceso (cerca de mil litros por cuero) y llegó a producir, en su máxima expansión, unos seis mil cueros curtidos por día. Se convirtió además en una fuente importante de trabajo. Los pobladores sufrían y se quejaban por los olores, la corrosión de las chapas de zinc, el tránsito pesado por las calles del pueblo. Pero esto no era suficiente para obligar a la fábrica a cambiar sus rutinas. Por ello, los pobladores más conscientes del peligro miraban al río, esperando que la constante contaminación se manifestase en algún momento de manera grave.

Y esto no ocurría. Aparecieron indicios de efectos nocivos sobre la salud: por ejemplo, un aumento inusual de cierto tipo de tumores que podría deberse al cromo en el agua. Pero obviamente la fábrica argumentaba que una fluctuación estadística no prueba una relación causa-efecto.

Finalmente, la fiebre saltó por otro lado. En 1995 se detectó un caso de metahemoglobinemia en un bebé. Esta enfermedad, también llamada “síndrome del niño azul”, es causada por una alteración de la hemoglobina de la sangre que provoca que ésta transporte menos oxígeno; los niños se ponen cianóticos (con la piel azulada) ya que sus tejidos reciben insuficiente oxígeno. El caso tomó relevancia periodística y comenzaron a investigarse las causas.

El agua que alimentaba al pueblo provenía de perforaciones, ya que no existían redes de agua corriente. Las perforaciones para extracción de agua potable se realizaban hasta la segunda napa (subacuífero Pampeano), la cual generalmente proporcionaba agua de muy poca calidad para el

consumo, o bien hasta la tercera napa (subacuífero Puelchense), la cual proporcionaba agua potable de buena calidad y en cantidad. A pesar de que en la casa del niño afectado el agua provenía del subacuífero Puelchense, la misma tenía un alto contenido de nitratos; unas sales que en el intestino de los lactantes de entre 4 y 6 meses de edad se transforman en nitritos y producen la metahemoglobinemia. El niño se había intoxicado con la leche maternizada reconstituida con agua de consumo domiciliario. Los nitratos indicaban que en la napa Puelchense se había filtrado agua de mala calidad de la napa Pampeana. Pero ¿qué tenía que ver esto con la curtiembre?

El caso es que, en general, entre las dos napas el agua no filtra, pero el enorme consumo por parte de la fábrica (6 millones de litros de agua por día) produjo un efecto de succión que, a través de perforaciones con caños mal encamisados, no perfectamente aislados, filtró agua de la segunda napa hacia la tercera.

Fue recién entonces que la movilización de los vecinos, las acciones legales y la difusión periodística hicieron explotar el conflicto con la empresa. Poco tiempo después, algunos investigadores que trabajaban en el río Luján descubrieron por qué no habían detectado allí valores altos de cromo. El efluente con las sales de cromo disueltas era más denso que el agua del río, y por ello se hundía en el cauce, que en esa zona es profundo por la existencia de una pequeña represa. Como las muestras se tomaban en superficie, el cromo no aparecía, puesto que se difundía por el río a mayor profundidad y quedaba también atrapado en los sedimentos del fondo. Una bomba de tiempo.

La pregunta que surge de este ejemplo es: ¿por qué fue necesario perder tanto tiempo y que un bebe se enfermara para llegar a conclusiones que, a posteriori, parecen obvias?

Por supuesto sabemos, porque la experiencia nos lo enseña cada día, que la evolución de estos conflictos depende de la movilización y de la capacidad de acción política de actores que representan intereses contrapuestos. La fábrica no sólo se defendió legalmente, sino que también mintió e intentó vencer a los vecinos de lo bueno que era incorporar cromo en la dieta. Se sospecha incluso que sobornó a funcionarios, legisladores y técnicos. También utilizó su poder de extorsión, aprovechando que era una gran fuente de trabajo en una época en la que éste no abundaba. Sólo cuando los pobladores lograron organizarse pudieron, en parte, contrarrestar esa fuerza.

Pero, reconocida la importancia de la acción política, en este artículo queremos señalar otro componente que falló: hubo errores en la metodología de la evaluación científica del evento, y trataremos de argumentar que eso se debió, fundamentalmente, a la manera en que está organizada esa tarea y a la metodología que tal organización induce.

Empecemos por notar que el análisis de este caso nos enfrenta a un problema complicado, ya sea por la cantidad de variables (y actores) en juego, o porque estas variables son normalmente estudiadas en contextos inconexos por distintas

disciplinas. Más en detalle, se trata de un sistema funcional que se había mostrado relativamente estable ante perturbaciones precedentes al evento y cuya funcionalidad o comportamiento emerge como consecuencia de la interacción de todas sus variables, y por ende requiere un enfoque interdisciplinario. Recordamos aquí la importante enseñanza de Rolando García, cuando en sus estudios sobre el proceso de desertificación subrayó la necesidad de una nueva organización de la investigación para tratar este tipo de problemas. Rolando García juzgó como insuficiente un enfoque sólo *multidisciplinario*, en el sentido de yuxtaposición de expertos de distintas disciplinas que estudian cada uno su parte del sistema sin encontrarse, sin discutir, sin interactuar entre sí; y lo contrapuso a la conformación de equipos *interdisciplinarios* autocordinados, habituados a la colaboración y capaces de atacar el problema con una visión simultánea de todas sus dimensiones. Es la única manera de captar la emergencia de comportamientos que son consecuencia de las interacciones de distintas partes del sistema.

Sistemas como el evocado o los ecosistemas agrícolas que estudió García son considerados hoy ejemplos de una nueva categoría llamada *sistemas complejos*, aunque es necesario aclarar que el concepto mismo, su definición, está todavía en construcción. En el recuadro que acompaña este artículo se puede leer una aproximación a tal definición, que refleja bastante bien la opinión actual de la comunidad científica. Sin embargo, seguramente el concepto va a seguir evolucionando. Lo que sí podemos dar por adquirido, por experiencia, es que muchos ejemplos de sistemas autoorganizados, desde *sistemas sociales (redes)*, *biosistemas*, *ecosistemas*, hasta formas de agregación de materia que pueden ser estudiadas en laboratorio, como *redes autocatalíticas* o *vidrios*, presentan analogías y similitudes que justifican su estudio comparado. Por un lado, los mismos instrumentos analíticos se han verificado útiles en ejemplos bien distantes, y por otro lado, se han observado comportamientos similares.

Es notable, por ejemplo, que un fenómeno que sorprendió como el caso que contamos aparece sistemáticamente en muchos sistemas complejos. Nuestros prejuicios (o esperanzas) nos llevan a suponer que genéricamente las respuestas de un sistema deben ser lineales, es decir, que a una pequeña perturbación le corresponde un efecto pequeño, y a una perturbación doble, un efecto doble. Y si no hay efecto, entonces querríamos concluir que el sistema es inmune. Por eso, la aparente ausencia de cromo en el río tranquilizó en su momento.

Éste no es el comportamiento típico de los sistemas complejos. Éstos (pensemos en un ser vivo) se autoorganizan explotando las interacciones de sus distintas variables para generar una serie de respuestas que les permiten contrarrestar y amortiguar perturbaciones dañinas a su estabilidad o funcionalidad, siempre que éstas no se acumulen mas allá de un cierto umbral. El problema es que, muchas veces, cuando se supera dicho umbral el resultado es catastrófico y no puede ser revertido.

Tomemos como ejemplo la discusión actual sobre el *calentamiento climático*. Estamos inyectando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera en cantidades alarmantes, y hasta ahora la actitud de muchos países es la de minimizar el peligro, porque los signos de la respuesta del sistema Tierra parecen ser pequeños.

Deberíamos entonces recordar lo que sucedió en el Lago Nyos, en Camerún, en 1986. En ese lago tropical las aguas superficiales son más calientes y menos densas que las profundas, por lo que hay muy poca mezcla vertical. En las aguas profundas se había disuelto una gran cantidad de CO<sub>2</sub> (se cree que por filtración de un volcán cercano). Si hubiéramos tomado una muestra de esas aguas profundas y la hubiéramos llevado a la superficie, la habríamos visto bullir como soda al salir del sifón. El dióxido de carbono estaba atrapado por la enorme presión y todo parecía estable. Pero no era estable, sino *metaestable*; una situación muy común en sistemas complejos. En 1986, un desprendimiento de sedimentos cayó en el lago revolviendo las aguas profundas, de tal manera que el agua sobresaturada

se encontró a menor presión. El CO<sub>2</sub> empezó a borbotear, lo que agitó aún más las aguas. De pronto, el lago explotó y emitió 80 millones de metros cúbicos de CO<sub>2</sub>, el cual desplazó al oxígeno de todo el valle y mató por asfixia a 1.800 personas y a un número incalculable de ganado y animales.

¿Puede suceder un fenómeno similar con el CO<sub>2</sub> disuelto en los océanos, o con el cromo en el río Luján?

Puede sorprender que la respuesta a esta pregunta provenga de un sistema por completo diferente. Hace tiempo que en nuestro equipo de trabajo venimos investigando el comportamiento de pequeñas comunidades de algas microscópicas, similares a las que forman el conocido “verdín” de las piscinas, y cómo se comportan ante perturbaciones del ambiente. Es evidente que estos sistemas no se parecen en nada al sistema del río con cromo en sus sedimentos. Sin embargo, por el hecho de ser sistemas complejos se pueden hacer analogías entre ambos. Si uno de ellos presenta cambios bruscos de estado ante perturbaciones externas, pero sólo cuando esas perturbaciones alcanzan un



## ¿Qué es un sistema complejo?

En términos genéricos, un sistema complejo es un sistema que comprende muchas entidades heterogéneas que interactúan fuertemente creando múltiples niveles de estructura colectiva y organización. Entre ellos se incluyen los sistemas naturales, desde las biomoléculas y las células vivientes hasta la ecosfera y los sistemas sociales, así como algunos sistemas artificiales sofisticados como la red Internet y la grilla eléctrica. La causa de que la especificidad de los sistemas complejos no haya sido suficientemente estudiada por la ciencia tradicional es la existencia de superestructuras no triviales que dominan el comportamiento del sistema y que no pueden, de manera fácil, ser conectadas con propiedades de las entidades constituyentes. No solo se presentan estructuras emergentes que surgen de los niveles inferiores sino que también los patrones así creados retroactúan sobre esos niveles inferiores.

En muchos casos, los sistemas complejos aparentan una extraordinaria robustez ante perturbaciones multidimensionales y tienen una capacidad de adaptarse y persistir de manera estable. Debido a su complejidad inherente, que requiere un análisis en muchas escalas de tiempo y espacio, estos sistemas representan un desafío para una ciencia que intenta su descripción efectiva, su incorporación en teorías que expliquen su funcionamiento y por fin que evalúen su construcción o gestión. Para los sistemas artificiales hay un ulterior desafío: diseñarlos de manera tal que se adapten y persistan ante cambios del contexto, lo cual probablemente implique una modelización a distintos niveles de detalle.

Los sistemas complejos requieren un enfoque interdisciplinario: primero porque todas las cuestiones que tratan aparecen casi en idéntica formulación en objetos que pertenecen a disciplinas extremadamente diferentes, desde la biología hasta redes de computadoras o hasta sociedades humanas; segundo, porque los modelos y métodos que atacan estas cuestiones también pertenecen a distintas disciplinas, básicamente ciencias de la computación, matemática y física; por último, porque los enfoques especializados tradicionales raramente se focalizan en los múltiples niveles necesarios en el contexto de los sistemas complejos.

Extraído de la propuesta “Campus Digital en Sistemas Complejos” que la UNGS junto con otras 78 instituciones de Europa, África y Latinoamérica presentaron a la UNESCO y fue aprobado por ésta el 19 de agosto de 2013.



valor crítico, es posible que el otro también lo haga. Aunque los sistemas son muy diferentes, los modelos matemáticos que los describen son similares y, más importante aún, las ideas y los conceptos que nos permiten comprenderlos son similares también.

Así, una capa de algas que crece en aguas corrientes se mantendrá en un estado estacionario ante flujos de agua de velocidades moderadas. Mientras tanto, la comunidad se va autoorganizando, es decir, haciéndose cada vez más compleja en su estructura. Si la velocidad del agua aumenta, la comunidad cambia en forma imperceptible. Estamos en un estado en el que la interacción entre los organismos estabiliza el sistema. Sin embargo, cuando la velocidad del agua alcanza un nivel crítico, las microalgas pueden desprenderse masivamente del lugar en que están adheridas, y la estructura se desintegra casi totalmente: el sistema tiene que volver a empezar.

Algo muy similar puede suceder con la velocidad de la corriente del río y el cromo contenido en los sedimentos. Una creciente brusca (como la que se produce en las esporádicas inundaciones) puede alcanzar valores que produzcan que el cromo se disuelva nuevamente en el agua (un efecto parecido podría producirse si la acidez del río llega a un valor crítico). Sin duda, eso produciría efectos letales masivos en los peces y en muchos otros organismos ligados al agua o que viven en ella. El sistema se desorganizaría bruscamente.

El segundo fenómeno observado en el caso de la curtiembre es también paradigmático. Nuevamente, hay un efecto *umbral*. Si extraemos una cantidad de agua de una napa, normalmente no afecta la calidad del agua ni produce filtraciones peligrosas. Pero si de pronto extraemos *en un mismo punto de la napa* 6 millones de litros adicionales, debemos esperar efectos nuevos.

Es difícil suponer que la anticipación de efectos nuevos pueda ser analizada siguiendo protocolos determinados sólo por experiencias previas. Como señala también Rolando García, tales prácticas revelan una metodología muy limitante, pues se reduce a pura *inducción* cuando, para decirlo con Pierce, necesitamos *abducción*, que en palabras simples significa *intuición*, capacidad de proponer (adivinar) las mejores hipótesis de trabajo que deberán ser puestas a prueba experimentalmente. La elección de tales hipótesis es la parte más creativa del quehacer científico, y depende fuertemente de analogías con resultados obtenidos en contextos muy diferentes.

En muchos casos, el personal que trabaja en las instituciones demuestra suficiente intuición, sentido práctico y curiosidad para dejar de lado cualquier protocolo fosilizado. Por ejemplo, en el caso descrito fueron los mismos técnicos que inicialmente habían concluido la ausencia de cromo en el río quienes tiempo después, intrigados por el problema, descubrieron que el cromo se había depositado en el fondo del cauce. Pero sería erróneo esperar que el espíritu humano siempre supere a las instituciones burocratizadas en las cuales lo metemos y, sobre todo, sería irresponsable no intentar otro tipo de organización que favorezca la acumulación de analogías que enriquezcan nuestra intuición creativa.

Entre paréntesis, desde una perspectiva más política, el así llamado *principio precaucional* fue propuesto para protegernos de aquellos cambios de gestión humana que podrían provocar alteraciones bruscas e irreversibles en el ambiente. En palabras simples, propugna mantener el *statu quo*, no innovar si existen riesgos de cambios irreversibles, independientemente de la probabilidad de éstos. Tomado al pie de la letra, este principio es difícil de implementar; lo que llevó, en la práctica, a aceptarlo como norma ética e ignorarlo en la política. Pero independientemente de sus dificultades, la búsqueda de nuevos caminos o propuestas investigativas no contradice tal principio, como así tampoco el estudio riguroso de los fenómenos en cuestión, que pueda llevar a valorar de manera cuantitativa los distintos riesgos.

De allí una propuesta de creación de equipos interdisciplinarios que se reúnan de forma periódica y que estudien comparativamente ejemplos de sistemas complejos y las herramientas analíticas que sirven en tales casos, imbuidos también de una nueva actitud sobre el conocimiento científico que dé lugar a propuestas integrales que se impongan frente a los planteos puramente especializados que tuvo el desarrollo científico en el siglo pasado.

Desde la UNGS, conjuntamente con 78 instituciones académicas de Europa, Latinoamérica y África, hemos suscripto y presentado ante la UNESCO una iniciativa de colaboración internacional llamada "Campus Digital en Sistemas Complejos". Esta iniciativa fue aprobada por la UNESCO el 19 de agosto de 2013. El objetivo principal es avanzar en la construcción de una ciencia de los sistemas complejos. El instrumento propuesto es la localización en la "nube" (la red de Internet) de una colaboración internacional potenciada. La estrategia es aprovechar la experiencia de estos 78 grupos para encontrar y comprender analogías, similitudes y diferencias de muchos sistemas complejos. Cada sede se compromete a poner a disposición de las demás en el Campus Digital los resultados obtenidos en los ejemplos considerados, las herramientas analíticas—incluidos los programas de computadora usados—, los contenidos de los cursos y los datos con que cuenta.

De forma temporal, la información se encuentra en la página del Campus Digital (<http://unitwin-cs.org>), de la cual hemos tomado la definición de sistemas complejos que se encuentra en el recuadro. Allí se puede encontrar información sobre las actividades de los grupos de África y Europa. En la Argentina, además de las dos instituciones que ya forman parte del Campus Digital (el Instituto Balseiro de Bariloche y la Facultad de Economía de la UBA) hay cultores del tema en Córdoba, La Plata y Mar del Plata, así como también en otras instituciones del Gran Buenos Aires, como la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería de la UBA o el Instituto Tecnológico Buenos Aires, entre otras. En nuestra sede, los sistemas estudiados incluyen: redes genéticas, materiales amorfos, ecosistemas, redes industriales, mercados financieros, la ciudad, etc. La organización efectiva de todo este capital humano, en momentos donde Internet multiplica las formas de colaboración, representa el enorme desafío asumido por la UNGS. ■

## Rolando García

El pensador argentino Rolando García, citado en este artículo, falleció en México el 15 de noviembre de 2012. No pudimos discutir con él nuestras ideas y contarle nuestra experiencia. Pero conociendo su trayectoria política podemos estar seguros de que al leer en el estatuto de la UNGS que "la investigación permite articular las actividades de la Universidad con las necesidades sociales, económicas y científico-técnicas asumidas como objeto de su consideración académica: las transformaciones recientes, los cambios de paradigmas, la educación, la industria, el conurbano, el desarrollo humano", habría comentado: no hacen más que acercarse un poco a esos vastos propósitos.

## EDICIONES UNGS



### Biología y ecología de la fauna del suelo

Fernando Momo y Liliana Beatriz Falco (compiladores)  
UNGS - Imago Mundi  
Colección Ciencia, innovación y desarrollo



### El sistema argentino de innovación: instituciones, empresas y redes. El desafío de la creación y apropiación de conocimiento

Diana Suárez (compiladora)  
UNGS  
Colección Ciencia, innovación y desarrollo

Más información sobre los libros de la Universidad en:  
[www.ungs.edu.ar/ediciones](http://www.ungs.edu.ar/ediciones)  
[ediciones@ungs.edu.ar](mailto:ediciones@ungs.edu.ar)  
(54 11) 4469-7578

## PRÓXIMO NÚMERO

- Número 12 - 7 de noviembre  
**De emprendedores, futbolistas y animales**

Universidad Nacional de General Sarmiento 

Juan María Gutiérrez 1150 (entre José León Suárez y Verdi)  
Conmutador: 4469-7500 - C.P. 1613 - Los Polvorines - Pcia. de Bs. As. - Argentina  
[info@ungs.edu.ar](mailto:info@ungs.edu.ar)

[www.ungs.edu.ar](http://www.ungs.edu.ar)

prensaUNGS

