
Simulació i canvi social una aproximació evolucionària*

Sandra González Bailón

Resum: L'objectiu de la ponència és defensar que la simulació és una eina hermenèutica fonamental per construir i contrastar teories sobre el canvi social. La simulació s'ha convertit en una de les eines més comunes en l'estudi dels sistemes complexos. I com que de sistemes complexos n'hi ha molts, també són diverses les tècniques de simulació. Totes elles comparteixen, però, un mateix objectiu: crear escenaris artificials que simulin el comportament del món real. Els models de simulació que s'examinaran són els que tenen com a rerefons teòric la teoria de la complexitat i la teoria evolucionària. Aquests models són els autòmats cel·lulars, els models multiagent i els algoritmes genètics. Es destacarà el potencial analític que tots ells ofereixen per explicar processos de canvi social.

Introducció

Les societats són sistemes adaptatius complexos: això vol dir, d'una banda, que en elles es donen dinàmiques evolucionàries; i, de l'altra, que aquestes dinàmiques són caòtiques, és a dir, estocàtiques i, per tant, difícilment predictibles. La virtut de les tècniques de simulació per analitzar-les és doble: a més d'obrir un camp d'experimentació no sempre factible en els sistemes reals, la simulació contribueix a afinar el coneixement dels processos que estudia. Només amb sistemes les lleis dels quals estan estrictament definides és possible donar cabuda al seu potencial analític. És a dir, la simulació només treballa amb teories ben formulades. I això, amb independència dels resultats, és ja un valor a potenciar al qual s'hi suma la recerca de les dinàmiques subjacents en els sistemes complexos.

* Aquesta ponència ha estat possible gràcies a l'ajuda atorgada per una beca FPU del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, adscrita al projecte d'investigació PB98-1192.

La teoria de la complexitat és el que dona certa unitat de rerefons al que després es diversifica en contingut i en tècnica. Els gens, els virus, els organismes, les poblacions o ecosistemes sencers poden ser el centre i objecte dels models de simulació. També les xarxes neuronals, els individus, les societats o els estats en les seves relacions internacionals. Tots ells són sistemes complexos dels quals emergeix un ordre que no s'anticipa ni de la natura ni de l'anàlisi (per detallat que sigui) de les parts. D'aquí que la teoria de la complexitat estigui tan vinculada amb la teoria del caos i amb els sistemes estocàstics. I, malgrat que la simulació no es redueix als sistemes no lineals, el cert és que els seus horitzons més prometedors són els que experimenten amb ells, en especial amb els sistemes adaptatius d'origen evolucionari. Per aquesta raó, aquesta ponència pren com a punt de partida les diverses temàtiques de la complexitat –en especial, la noció d'emergència—per passar, després, a les tècniques de simulació i al seu ús en ciències socials.

1.- La teoria: els sistemes adaptatius complexos

La teoria de la complexitat sotmet a estudi aquells sistemes que exhibeixen uns processos de canvi que no poden ser descrits per una única llei direccional i que, a més a més, són irreductibles als elements que els conformen. És a dir, analitza aquells sistemes en els quals si tot és més que la suma de les parts és perquè generen efectes emergents que no es redueixen als (ni s'expliquen exclusivament pels) elements que els van donar origen. Amb el desenvolupament de màquines de computació cada cop més potents, s'han eixamplat les possibilitats de processar les grans quantitats de dades que conformen els sistemes complexos, que s'han fet així més susceptibles d'estudi. Aquesta és, de fet, la tasca tècnica de la simulació: modelar abstractant els trets més significatius del món, però sense reduir o simplificar-ne els nivells.

L'emergència és un dels trets més característics dels sistemes complexos, que són sistemes ubicats entre l'ordre més determinista i previsible, i el caos més atzarós i desordenat. La complexitat suposa processos irreversibles, temporals, no lineals, aleatoris i fluctuants, és a dir, que és un motor de creació constant de nous estats i possibilitats. La noció d'emergència apel·la precisament a això: que la interacció (no lineal) entre les parts que configuren el sistema produeix un comportament global que no pot deduir-se dels comportaments individuals que el van generar. Hi ha regularitats en el comportament del sistema que no poden ser revelades mitjançant la inspecció directa de les lleis que segueixen els seus components. Les regles que regeixen el comportament dels components són només un punt de partida, una

definició de principi que és incapaç d'anticipar com seran els estats futurs. L'única forma d'esbrinar-ho és, de fet, simulant l'evolució del sistema per tal de poder explorar l'espai de les seves possibilitats.

Els fenòmens emergents poden ser, a més, patrons de comportament que persisteixen malgrat haver estat generats per components canvians. Aquests patrons de comportament (que superen els seus components) sovint obeeixen macrolleis que permeten prescindir de les lleis, de rang inferior, que els van donar origen. De l'existència d'aquestes lleis de nivell superior es deriva la persistència (o supervivència) diferencial dels efectes emergents. Segons l'aproximació evolucionària, els patrons que perduren el temps suficient com per a produir còpies d'ells mateixos, són els que generen noves variants. La persistència diferencial juga, doncs, un paper fonamental en els processos generadors d'emergència, que és una mescla de necessitat i atzar: de les múltiples combinacions possibles d'elements, se'n donen unes i no d'altres; i d'aquestes, al seu torn, es generen noves combinacions de les quals només sobreviuran unes quantes.

El pas d'allò extremadament improbable a allò sumament factible és una de les principals característiques dels sistemes que exhibeixen fenòmens emergents. Fins i tot els patrons més infreqüents acaben adonant-se si el sistema evoluciona durant el temps suficient. Un cop se n'adonen, si són patrons adaptativament estables, per definició perduraran en el sistema per molt improbables que puguin ser. Així és l'emergència en els sistemes adaptatius complexos, ja siguin colònies de formigues, xarxes neuronals, sistemes immunològics, Internet o l'economia global. Tots ells tenen una mateixa lògica subjacent: les possibilitats del sistema van més enllà de les dels seus constituents (és a dir, del sistema en surt més del que entra); i aquestes possibilitats són, en realitat, essencialment combinatòries. Un petit nombre de regles o lleis poden generar sistemes d'una sorprenent complexitat, com en el cas de, per exemple, el joc d'escacs. Però el que és essencial en l'emergència és que aquesta complexitat no es redueix a un cúmul de patrons de comportament aleatori sinó que en ella existeixen trets i pautes no trivials, que es poden reconèixer i que, en repetir-se amb freqüència, tenen un gran potencial explicatiu. Són aquestes regularitats el que permeten, d'entrada, modelar la complexitat.

L'ésser humà s'aproxima temptativament al món mitjançant la construcció de models. Prescindir dels detalls per copsar allò fonamental és l'objectiu de la construcció de qualsevol model: el seu èxit depèn del fet que aconseguixi simplificar allò que modela sense convertir-lo en quelcom trivial. Els models tracten de desglossar el món

en les parts que el constitueixen per tal d'escollir d'entre elles les que més interessa destacar en funció dels pressupòsits teòrics que hi hagi al darrere. La lògica de la construcció de models no està molt allunyada de la de qualsevol joc de construcció: se seleccionen els blocs i s'estableixen les regles que ens diuen com combinar-los. Si el model ha estat ben concebut, un cop construït exhibirà la complexitat i els efectes emergents del sistema que modela, però prescindint dels detalls i de les seves possibles distorsions. Els jocs de taula són un exemple simple de models d'emergència: d'unes quantes regles senzilles emergeix una gran complexitat d'alternatives i resultats. Les regles restringeixen les possibilitats: no totes les configuracions que el tauler possibilita són legals. Tot i així, el nombre de configuracions legítimes continua sent ampli i les formes de moure's d'una configuració a una altra, intrincades.

Hi ha, doncs, una estreta relació entre jocs i models que es tradueix en certa terminologia adoptada no per casualitat. En concret, es poden destacar tres conceptes: estat del joc, arbre de moviments i estratègies. L'estat del joc és la posició que les peces ocupen en el tauler en un moment concret del joc; l'arbre de moviments és l'espectre d'escenaris de joc possibles; i les estratègies, els possibles cursos d'acció que a cada estat del joc tenen disponibles els jugadors. Si s'introdueixen en un ordinador les regles del joc, i les regles que determinen les estratègies dels jugadors, l'ordinador pot, moviment a moviment, determinar el curs d'aquest. El sistema sencer està, doncs, plenament definit en forma d'algoritmes. Però, en la mesura en què els jugadors ajusten les seves estratègies a la dels oponents, el joc (co)evoluciona de tal forma que d'ell emergeix la imprevisibilitat pròpia de qualsevol sistema complex. A mesura que avança el joc, s'exploren zones de l'arbre de moviments que no havien estat prèviament observades, ni tan sols anticipades. Qualsevol petita modificació en les condicions d'origen del joc (en el seu estat inicial) condueix a zones completament dispars de l'arbre d'estats possibles. Però la construcció i simulació de models permet estudiar les pautes de comportament dels sistemes complexos i acotar l'espai de les seves dinàmiques.

La construcció de models de sistemes complexos ha de tenir en compte, per tant, els següents elements: (i) els mecanismes, ja siguin blocs de construcció o agents; (ii) la possibilitat de novetat constant, derivada del gran nombre de configuracions que els mecanismes poden generar; (iii) les regularitats o estructures recurrents que apareixen en aquestes configuracions en forma de patrons de comportament; i (iv) l'organització jeràrquica que es dona entre els diferents nivells d'anàlisi: les configuracions que es generen a un nivell es converteixen en generadors en el nivell organitzatiu superior o, dit d'una altra manera, a cada nivell d'observació les combinacions persistents del nivell

anterior restringeixen el que ha d'emergir al nivell següent. Doncs bé, resulta que les possibilitats d'emergència són dobles quan els mecanismes són capaços d'adaptar-se a l'entorn mitjançant l'aprenentatge. És precisament això el que preveu l'aproximació evolucionària i el que passa a la majoria dels sistemes reals.

2.- La tècnica: els models de simulació

Les tècniques de simulació introdueixen en el camp de les ciències socials noves possibilitats teòriques i analítiques. Igual que en els models estadístics, les simulacions compten amb uns *inputs* introduïts per l'investigador, i amb uns *outputs* que van sorgint a mesura que la simulació s'executa. Els *inputs* solen ser els atributs que fan que el model es correspongui amb un escenari real concret, i els *outputs* són el comportament que el model exhibeix amb el pas del temps. El primer objectiu de la simulació és, òbviament, assolir un millor enteniment dels escenaris que modela. Però la simulació també pot tenir uns altres usos més instrumentals, com la predicció en àrees d'investigació demogràfica o macroeconòmiques. Ara bé, si s'aplica a sistemes adaptatius complexos, la simulació concentra tot el seu valor analític en la capacitat que exhibeix per al descobriment i la formalització: mitjançant la construcció d'escenaris artificials és possible descobrir quines són les conseqüències de les presumpcions teòriques que els donen peu; i, a més, aquesta construcció exigeix una formalització algorítmica que obliga a la precisió conceptual i axiomàtica. D'aquí que els models de simulació tinguin, en ciències socials, un rol similar al de les matemàtiques en les ciències físiques.

La història de la simulació en ciències socials es remunta a principis dels anys seixanta, època en què van començar a utilitzar-se els ordinadors en la investigació universitària. Aquests primers experiments van consistir, bàsicament, en simulacions de fets discrets o en simulacions basades en les dinàmiques de sistema: les primeres modelaven el pas d'unitats a través de processos amb la finalitat de predir el ritme del procés (per exemple, el temps d'espera de clients en una cua o el temps que els cotxes de policia d'una determinada ciutat trigaven a arribar a l'emergència); les segones, feien ús d'un ampli sistema d'equacions diferencials per anticipar les trajectòries de determinades variables al llarg del temps (com van fer, per exemple, els estudis sobre el futur de l'economia mundial del Club de Roma).

Una altra aproximació que també es va desenvolupar aleshores va ser la microsimulació, basada en una àmplia mostra presa a l'at-

zar d'entre una població d'individus, llars i empreses. Aquest model consisteix en el següent: a cada unitat se li atribueixen un seguit de probabilitats transitives que determinen les possibilitats que aquesta unitat es vegi sotmesa a un canvi determinat en el termini d'un any (per exemple, les probabilitats que una dona situada en un cert rang d'edat sigui mare durant aquest temps). Després que cada unitat hagi estat sotmesa a aquesta assignació de probabilitats, el procés es repeteix pel següent any, fent avançar així la mostra de població a través del temps. A part la microsimulació, durant la dècada dels vuitanta es va dir poc sobre simulació en ciències socials, en contra del que va passar en les ciències naturals, on la simulació es va consolidar com una eina metodològica bàsica. No obstant això, a principis dels noranta, la situació va canviar radicalment com a conseqüència del desenvolupament dels models multiagents, que oferien la possibilitat de simular individus autònoms i les seves interaccions amb altres individus. Aquests models provenien dels estudis encetats a les diverses ciències sobre dinàmiques no lineals i intel·ligència artificial.

Els autòmats cel·lulars

Els autòmats cel·lulars són models que construeixen una gran xarxa de cel·les cadascuna de les quals pot estar en un nombre petit d'estats. El canvi d'un estat a un altre depèn de les regles que defineixen quina influència tenen les cel·les veïnes, aquelles que envolten de manera immediata la primera però que, en tot cas, també és un paràmetre a definir: les cel·les veïnes poden ser les vuit immediates, o poden ser només les quatre que es corresponen amb els punts cardinals, o només les que formen l'aspa d'un molí. En concret, els autòmats cel·lulars poden caracteritzar-se així: (i) les cèl·lules (o cel·les) poden organitzar-se en una sola línia, en una xarxa rectangular o fins i tot en cubs tridimensionals. En simulacions socials, les cèl·lules poden representar individus o actors col·lectius com Estats; (ii) els estats en què poden estar les cèl·lules són molt limitats, com *encesa* o *apagada*, *viva* o *morta*; però també poden representar actituds (com donar suport a un determinat partit polític), característiques individuals (com l'origen racial), o accions (com cooperar o no cooperar amb els altres); (iii) el temps avança de forma discreta, és a dir, a través de passos. En cadascun d'ells, l'estat de les cel·les pot modificar-se en funció de: (iv) un conjunt de normes que especifiquen la forma en què un estat depèn de l'estat previ i de les cèl·lules veïnes; i (v) en la mesura en què les regles només fan referència a les cèl·lules veïnes, els autòmats cel·lulars només són útils per modelar

situacions en les quals les interaccions són locals.

Un dels autòmats cel·lulars més simples és el Joc de la Vida. Aquest model preveu dos possibles estats per a cadascuna de les cel·les: que estigui encesa (*viva*) o apagada (*morta*). Si una cel·la està apagada (que, en termes binaris, equival a l'estat 0), i exactament tres de les vuit cel·les que l'envolten estan enceses (estat 1), aleshores la cel·la s'encendrà en $t+1$. En qualsevol altre cas, romandrà apagada. Si la cel·la està encesa i també ho estan dos o tres de les cel·les que l'envolten (però no més dos o tres d'elles), aleshores en $t+1$ la cel·la romandrà encesa. En qualsevol altre cas, s'apagarà. Aquestes són les restriccions que obren l'ampli ventall de possibilitats que aquest microunivers ofereix.

Els autòmats cel·lulars han estat utilitzats en moltes àrees de la física, la biologia, les matemàtiques i les ciències socials. Són útils per analitzar els resultats emergents que poden generar milions d'esdeveniments microscòpics. L'exemple més simple és el Joc de la Vida, però n'hi ha d'altres, com el model de difusió, per exemple. En ell, els individus són modelats com cèl·lules, i les seves interaccions són definides en funció del veïnat. Aquest model permet simular, entre altres, la difusió del coneixement, de les innovacions tecnològiques o de determinades actituds.

Els models multiagent

Els models multiagent estan molt vinculats al desenvolupament de la intel·ligència artificial. En un començament, la intel·ligència artificial només modelava la cognició individual, però a partir dels anys vuitanta va augmentar l'interès per la intel·ligència artificial distribuïda, camp en el qual s'examinen les propietats de programes d'intel·ligència artificial que interactuen entre si. Amb el desenvolupament d'Internet, molts investigadors van començar a interessar-se en programes (agents) capaços de rebre o recollir informació d'altres ordinadors, valorar en funció de l'experiència passada i decidir quina acció prendre. En la mesura en què aquests models utilitzen agents autònoms, poden ser utilitzats per a simular societats humanes.

Els models multiagent són, de fet, autòmats cel·lulars però amb agents molt més complexos. Els agents es converteixen en programes capaços de controlar les seves pròpies accions basant-se en les percepcions que extreuen de l'entorn. L'objectiu és el de crear programes capaços d'interactuar intel·ligentment amb aquest entorn. Per això, els agents necessiten tenir les següents propietats: (i) autonomia, per poder controlar directament les seves accions i els seus estats interns; (ii)

habilitat social, és a dir, algú tipus de llenguatge que els permeti interactuar amb altres agents; (iii) capacitat de reacció, per poder respondre davant les percepcions de l'entorn; i (iv) capacitat d'iniciativa, per tal que puguin prendre les seves pròpies decisions. És a dir, que el seu comportament és interpretat en els termes metafòrics d'un vocabulari de creences, desitjos, motius i fins i tot emocions. Aquesta adscripció d'intencionalitat a agents artificials pot suscitar grans controvèrsies filosòfiques, però a efectes pràctics, compleix una funció molt determinada: la de permetre modelar agents capaços de simular alguns dels aspectes (molt simplificats) de la intencionalitat humana.

Un primer exemple de models multiagent és el que proporciona l'anomenat *Sugarscape*, en el qual els agents són només una mica més complexos que els que apareixen als autòmats cel·lulars. Aquest model proporciona interessants resultats sobre l'emergència de xarxes socials (com xarxes d'intercanvi i de mercat) i sobre l'evolució social i la diferenciació cultural. *Sugarscape* modela una societat artificial en la qual els agents es mouen sobre una xarxa de 50 x 50 cel·les. Cada cel·la té una quantitat de sucre gradualment renovable, sucre del qual pot disposar l'agent situat en la cel·la bé per consumir (d'ell depèn la seva supervivència), bé per enmagatzemar (ja sigui per un consum posterior o per l'intercanvi). El sucre està desigualment repartit i els agents es mouen en la seva recerca segons la regla: "troba aquella cel·la no ocupada en la qual hi hagi el màxim nivell de sucre disponible de entre totes les cel·les que estiguin a la vista i trasllada't allà". L'habilitat per detectar sucre varia entre la població d'agents segons una lògica semblant a la de la dotació genètica: alguns agents poden veure, pel pur atzar d'un sorteig inicial, més lluny que altres. A més a més, els agents també es diferencien pel seu metabolisme: alguns necessiten més sucre que altres per sobreviure. Aquests dos elements doten el model d'una lògica evolucionària: només aquells agents més adaptats al seu entorn (el sucre no està igualment distribuït) són capaços de sobreviure. El model no triga en exhibir la emergència de xarxes d'intercanvi entre els agents, i una de conclusions més rellevants és que la distribució de salut (derivada del metabolisme) es torna més desigual amb l'aparició d'aquestes xarxes.

Els algorismes genètics

Els algorismes genètics formen part dels models d'aprenentatge, és a dir, d'aquells models en els quals els agents augmenten el seu coneixement i les seves habilitats a partir de l'experiència passada. Els models que posseeixen aquesta habilitat són molt útils per simular els processos cognitius dels individus, però, sobretot, per simular la

forma en què societats senceres s'adapten a través del temps a les circumstàncies que les envolten. Els algoritmes genètics estan basats en una analogia amb la biologia evolucionària: s'han desenvolupat per simular el procés de la selecció natural. I són útils per trobar solucions òptimes a problemes complexos. La base biològica en la qual els algoritmes genètics s'inspiren pot expressar-se així: en la natura els organismes individuals competeixen els uns amb els altres per recursos com menjar, aigua o abric. A més, els individus de la mateixa espècie també competeixen per trobar parella. Els individus amb més èxit en les dues competències seran els que podran deixar més descendència, en detriment dels menys afortunats, que en tindran poca o cap. Cada individu està format per un conjunt de gens que determinen la forma del seu cos i les seves habilitats. La reproducció sexual implica la combinació dels gens dels progenitors i el seu traspàs a la descendència. D'aquesta forma, els gens dels individus més adaptats s'expandeixen a la següent generació. Aquest procés combinatori (juntament amb les mutacions atzaroses) és el que genera una nova classe d'individus que no es trobaven prèviament a la població i que solen estar més adaptats a l'entorn. És seguint aquest procés que les espècies evolucionen.

És a dir que: (i) és la població com un tot la que evoluciona, no els individus, encara que siguin aquests els portadors del canvi; (ii) l'evolució només pot treballar mentre hi hagi diversitat: d'ella depenen les possibilitats combinatòries de la deriva genètica; (iii) mentre les espècies es van adaptant a l'entorn, aquest també pot canviar, potser com a resultat de la mateixa activitat adaptativa; i (iv) les habilitats o altres atributs que els organismes adquireixen durant la seva vida no són transmesos a la descendència: només ho és el material genètic. Doncs bé, són tots aquests trets els que els algoritmes genètics representen en forma de models. En aquests hi ha una població d'individus cadascun dels quals té un grau quantificable d'adaptació a l'entorn: els més adaptatius són emparellats amb altres individus igualment exitosos i ambdós produeixen una descendència en la qual es dona una combinació dels seus trets. Els pares moren i l'adaptabilitat dels membres de la nova generació es torna a mesurar. El procés es repeteix fins que l'adaptabilitat mitjana de l'espècie assoleix un valor òptim. Aquests models han estat utilitzats per analitzar, per exemple, l'evolució de la cooperació.

3.- La pràctica: anàlisi de processos

Els exemples d'anàlisi amb simulacions abunden no solament en les ciències naturals sinó també, i cada cop més, en les ciències socials. Els llibres que parlen de simulació social es multipliquen i apareixen

noves revistes especialitzades que fan de les tècniques de simulació centre d'interès i de debat. Això posa de manifest dues coses: d'una banda, que les ciències socials comencen a utilitzar massivament tècniques i metodologies consolidades des de ja fa temps en les ciències naturals; d'altra banda, que cada cop és més evident que certes temàtiques són comunes a ambdues ciències, els objectius de les quals, al final, no són tan llunyans ni tan diferents. A això apel·laven les línies introductòries d'aquest escrit quan es referien a la teoria de la complexitat com a unitat de rerefons de totes les variants de simulació. En aquesta última secció es destaquen tres exemples que, d'una forma o altra, manifesten aquest fet. La seva pretensió és la d'il·lustrar la forma en què operen els tres models de simulació presentats fins ara.

Autòmats cel·lulars: el sorgiment d'aliances nacionals

El primer exemple fa referència a una investigació empresa per Axelrod sobre com nous actors polítics, tals com aliances o imperis, poden emergir d'entitats més petites com els estats nació¹. El punt de partença del model són dues evidències històriques: que els nous imperis es formen construint una autoritat central que subordina a estats prèviament independents, exercint control sobre ells i monopolitzant l'ús de la força; i que, amb la mateixa freqüència, aquestes entitats poden desintegrar-se en porcions que poden tornar a ser capaces d'exercir la seva pròpia autoritat i de ser reconegudes com a estats de propi dret. Els trets característics d'aquests canvis són que, d'una banda, són endògens, és a dir, que la formació i dissolució d'imperis i aliances s'han dut ha terme sense la intervenció de guies externes; i, d'altra banda, que pràcticament en tots ells la coerció ha jugat una paper fonamental. El model d'Axelrod focalitza, precisament, el procés d'agregació d'actors. Les relacions entre els estats són modelades com un sistema de tributs en el qual els actors poden demandar el pagament de riqueses, sota l'amenaça de guerra si no compleixen el pagament. Els ingressos que els actors més forts obtenen dels més febles són utilitzats per a extreure més recursos a altres actors.

Per tal de simplificar el model, Axelrod confina els actors a un món uni-dimensional, en el qual son disposats al llarg de la circumferència d'un cercle per a què cada actor tingui veïns als dos costats. Els

¹ Axelrod, R. (1995), "A model of the emergence of new political actors", Dins Gilbert, N., i Conte, R., (eds), *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*, UCL Press, London.

actors només poden interactuar (és a dir, exigir tributs o formar aliances) amb els seus veïns immediats, és a dir, amb els actors que es troben a la seva esquerra i dreta. A cada pas temporal, un nombre d'actors escollits a l'atzar és activat. Cadascun d'ells pot exigir un tribut a qualsevol dels seus veïns, els quals poden escollir pagar o resistir-se i lluitar. Si escullen la darrera opció, aleshores els recursos de les dues parts es redueixen en un quart de la riquesa de la part contrària: així, la part més rica infligeix més danys que la part pobre. Aquesta és la regla de canvi d'estat per aquest autòmat cel·lular: l'estat d'una cel·la és mesurat per la seva riquesa, i la regla de tribut determina com canvia aquesta riquesa a cada pas temporal. A més, el model especifica una altra regla que, en cada pas de temps, assigna la mateixa quantitat de riquesa a cada cel·la per compensar l'estoc general de recursos.

El que aquest model posa de manifest és que les aliances sorgeixen com a efecte lateral de les interaccions. En concret, els compromisos entre actors augmenten com a resultat de tres classes de relacions: la de sotmetiment, quan un actor paga tribut a un altre; la de protecció, quan un actor rep tribut d'un altre; i la d'amistat, quan dos actors lluiten en un mateix bàndol contra un tercer bloc. Aquests compromisos són els que determinen la decisió dels actors a l'hora de pagar o lluitar enfront d'un tercer: les aliances sorgiran entre aquells que ja tinguin compromisos i la riquesa dels quals depengui, per tant, de la seva acció conjunta. Després d'executar la simulació (amb 1.000 passos temporals que, en aquest model, equivalen a anys), el resultat exhibeix que, efectivament, de les interaccions entre estats emergeixen clústers que actuen com a aliances. És a dir, que a l'hora d'escollir una estratègia d'acció, aquests grups prenen en consideració no solament els interessos particulars dels actors que els conformen sinó, més aviat, els interessos del conjunt sencer. Per tant, malgrat que aquest model no pugui plantejar-se com una simulació de la història real de l'evolució dels estats, sí que ajuda a clarificar i especificar algunes qüestions, com la de, per exemple, quines són les condicions mínimes per a què emergeixi un nou actor, o quins factors tendeixen a promoure aquesta emergència, o quins són els que poden promoure el col·lapse d'un actor agregat.

Models multiagent: l'aparició de societats organitzades en el paleolític superior

A diferència del model del *Sugarscape*, el model que s'exposarà aquí està basat en actors amb capacitats per a la representació i la inferència molt més complexos. El model forma part d'un projecte destinat a analitzar el creixement de la complexitat social entre la població huma-

na que poblava el sudoest de França en el paleolític superior². Va ser per aquesta època que es va produir el canvi de grups relativament petits i autònoms de caçadors-recol·lectors a grups molt més amplis, associats amb el desenvolupament de l'art de caverne, d'artefactes més elaborats i de les primeres formes d'intercanvi. Aquests són indicadors d'un desenvolupament en la complexitat social que inclou, també, l'aparició de rols i estatus i, en particular, de lideratge i de relacions d'autoritat. La hipòtesi és que aquests canvis es van produir com a conseqüència de certes pressions ambientals que van tendir a concentrar els recursos en llocs particulars i en particulars èpoques de l'any. Aquestes concentracions van conduir a un augment en la densitat de la població de la zona. I això, al seu torn, va suposar problemes de coordinació que es van solucionar mitjançant la divisió del treball i l'estratificació social.

El que pretèn simular aquest model és, precisament, l'efecte que aquestes condicions ambientals generen en el patró de les interaccions entre els agents. La simulació consisteix en un escenari amb una població d'agents mòbils i una distribució de recursos dels quals els agents extreuen la seva energia. Els agents són, ells mateixos, sistemes de producció que inclouen regles per exercir la comunicació entre ells, i que són capaços de construir els seus propis models sobre l'entorn, incloent-hi la resta de la població. Com que l'objectiu fonamental de la simulació és investigar la formació de relacions jeràrquiques, els agents tenen la possibilitat d'aconseguir els recursos en solitari, o bé de fer plans de treball conjunts amb altres agents per garantir l'obtenció col·lectiva d'aquests recursos. En situacions d'abundància, els agents troben més avantatjosa la primera alternativa; però quan els recursos es concentren, plans de treball més complexos (que involucren diversos agents) demostren ser més profitosos. Per tant, tal i com ja s'havia anticipat, els agents exhibeixen més capacitat de supervivència quan actuen com a membres de plans de treball col·lectius, els quals acaben desembocant en organitzacions jeràrquiques que distingeixen als qui guien dels qui es deixen guiar.

Algoritmes genètics: l'evolució de la cooperació

Una de les àrees en què els algoritmes genètics han estat més utilitzats és en la dels models d'acció racional. Des de la teoria de jocs

² Doran, J.E., Palmer, M., (1995), "The ESO project: integrating two models of Palaeolithic social change", Dins Gilbert, N., Conte, R., (eds), *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*, UCL Press, London.

evolucionària s'han investigat, per exemple, les condicions sota les quals els actors racionals són capaços de cooperar. És ben conegut que en situacions com les que representa el dilema del presoner, la no cooperació s'imposa com l'estratègia dominant, i els jugadors es veuen sotmesos a una lògica perversa que els tanca en un resultat subòptim. No obstant això, quan el dilema és iterat, l'adopció de l'estratègia egoista ja no resulta ser tan clara. Axelrod, per exemple, va utilitzar un algoritme genètic per a fer evolucionar diverses estratègies i trobar, d'entre elles, la més adaptativa, la que proporcionés millors resultats³. En el seu experiment, cada participant juga un dilema del presoner amb tots els altres jugadors d'una població, adoptant cadascun d'ells una estratègia. Aquells que obtenen millors resultats es *reproduïxen* per formar la següent generació, de tal forma que la descendència utilitza estratègies formades a partir de les estratègies dels pares. Axelrod va definir l'estratègia de cada jugador com una regla que determina el seu pròxim moviment (cooperar o desertar) sobre la base dels resultats dels seus tres jocs anteriors. Això significa que, com que hi ha quatre possibles resultats per a cada joc, les diferents combinacions ascendeixen a 64. Per a cadascuna d'elles, l'estratègia indica quin ha de ser el proper moviment.

A l'hora de dissenyar l'algoritme genètic, la estratègia de cada jugador és representada com si fos un cromosoma, utilitzant un codi que el permet combinar-se amb els codis d'altres cromosomes (estratègies) a l'hora de reproduir-se. En la mesura en què una estratègia pot ser codificada com a un conjunt de 64 C o NC (moviments futurs, cooperatius o no cooperatius), el model utilitza una seqüència de 64 bits. Com que també es necessita informació sobre com començar la sèrie de jocs, la seqüència augmenta fins a 70 bits. Cada un dels 70 C o NC (és a dir, cada una de les estratègies que pot seguir un jugador) representa un gen en un cromosoma imaginari de 70 bits de llarg. Amb aquests supòsits, Axelrod va generar una població inicial de 20 agents, cadascun d'ells equipat amb un cromosoma generat a l'atzar. Després, els va posar a competir, fent que cada jugador seguís l'estratègia codificada *genèticament*, i va mesurar l'adaptabilitat de cada agent en funció del seu èxit davant els altres 19 jugadors al llarg de 151 tornejos. Els més exitosos van ser utilitzats per a crear la generació següent i el procés es va repetir durant 50 generacions. La reproducció de cromosomes es va dur a terme utilitzant els dos mecanismes genètics: el creuament i la mutació.

³ Axelrod, R. (1987), "The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma", Dins Davis, L. (ed), Genetic Algorithms and Simulating Annealing, Pitman, London.

Els resultats d'aquest experiment mostren que, si bé en un principi les estratègies cooperatives tenen menys èxit que les cooperatives, a mesura que descendeix el nivell de cooperació, els beneficis de la deserció disminueixen perquè s'acaba imposant la mutua deserció. Després de 10 o 20 generacions, l'evolució de les estratègies comença a donar la volta: els jugadors que segueixen la norma de la reciprocitat fomenten la cooperació i obtenen millors resultats. És aleshores quan les puntuacions mitjanes de la població comencen a augmentar i la cooperació basada en la reciprocitat comença a establir-se i a propagar-se com l'estratègia més exitosa.

Bibliografia

- DAVIS, L. (ed.) (1987), Genetic Algorithms and Simulating Annealing. London: Ptman.
- GILBERT, N. i CONTE, R., (eds.) (1995), Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life. London: UCL Press.
- GILBERT, N. i TROITZSCH, K.G., (1999) Simulation for the social scientist. Buckingham: OUP.
- HOLLAND, J.H. (1998), Emergence. From chaos to order. Oxford: OUP.