
UNA RELACIÓ PROMETEDORA:

GENÈTICA, INTEL·LIGÈNCIA

ARTIFICIAL I TEORIA DELS JOCS

Ramon Marimon

Simulant els processos d'aprenentatge gràcies als programes d'Intel·ligència Artificial, es poden millorar les prediccions que la teoria dels jocs permet de fer en camps tan diversos com l'economia o la biologia. El segon article d'aquesta sèrie ens fa veure què tenen en comú la tria de la millor oferta en el mercat i el resultat de la competència entre diferents espècies animals.

En el seu llibre *el rellotger cec*, R. Dawkins assenyala que "La selecció natural és un rellotger cec; cec perquè no veu més enllà, no planifica les conseqüències, no té cap finalitat al pensament." Per contrast, el rellotger conscient, que sap que un bon disseny és la millor garantia de benefici futur, és l'agent econòmic per excel·lència. En aquest sentit, biòlegs i econòmics parlen de dos subjectes molt diferents, cosa que fa que totes dues ciències segueixin camins també diferents. Com veurem en aquest article, amb exemples senzills, aquests camins no estan pas tan lluny l'un de l'altre com tampoc ho estan dels avenços recents en Intel·ligència Artificial.

OPTIMACIÓ I RECERCA EN ENTORNS DESCONEGUTS; O ¿QUÈ TÉ A VEURE LA REPRODUCCIÓ DELS ÓSSOS POLARS AMB LES INVERSIONS EN BORSA?

Les decisions econòmiques normalment s'adopten en un context d'incertesa que sovint requereix

recerca i aprenentatge; el treballador busca la feina més convenient, el consumidor la millor relació qualitat-preu, i l'inversor en borsa la cartera més rendible.

Fixem-nos en un procés tan quotidià com és el de comprar una dotzena de taronges en un mercat (el lector més ambiciós pot substituir la dotzena de taronges per una cartera de valors). Si entrant al mercat ja se sap qui fa millor oferta, aleshores la decisió és trivial. Qualsevol persona que no comprés a qui ofereix la millor qualitat-preu podria ser considerada, amb força raó, *irracional*. Però si, per exemple, un és nou en el barri i no sap qui fa la millor oferta, aleshores ho ha d'*aprendre*.

Aquí seguirem una senyora en aquesta situació. Arriba al nou mercat, hi troba un parell de venedors de fruita i veu que les taronges van al mateix preu; tot i que les del primer estan embolicades amb paper de color marró i les del segon amb paper de color vermell. A fi de tastar-les, decideix comprar-ne mitja dotzena a cada venedor (vegeu la Figura 1). Una vegada és a casa

seva comprova que el primer venedor li ha venut dues taronges dolentes i el segon tres (a la Fig.1 marcades amb una ratlla). A la setmana vinent, es planteja si comprar-ne tota la dotzena al primer venedor. Però pensa "Com puc estar segura que la qualitat mitjana del primer venedor és millor? Al capdavall m'ha venut dues taronges dolentes, que vol dir que no en garanteix tampoc la qualitat. "Decideix, doncs, comprar-ne als dos venedors, tot i que més al primer (7 del primer). Un cop més, el primer venedor li ha venut dues taronges dolentes i el segon tres. De manera que, a la setmana que ve decideix no comprar totes les taronges als dos venedors i buscar una mica més pel mercat.

Així troba un tercer venedor (tan sols n'hi ha tres en el mercat) a qui compra una taronja (embolicada amb paper blanc) que resulta bona. Les setmanes següents compra sempre segons els mateixos principis. A saber, tendeix a comprar a cada venedor més o menys taronges segons n'hagi obtingut uns resultats millors o pitjors i, de tant en

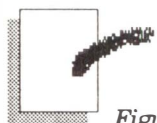
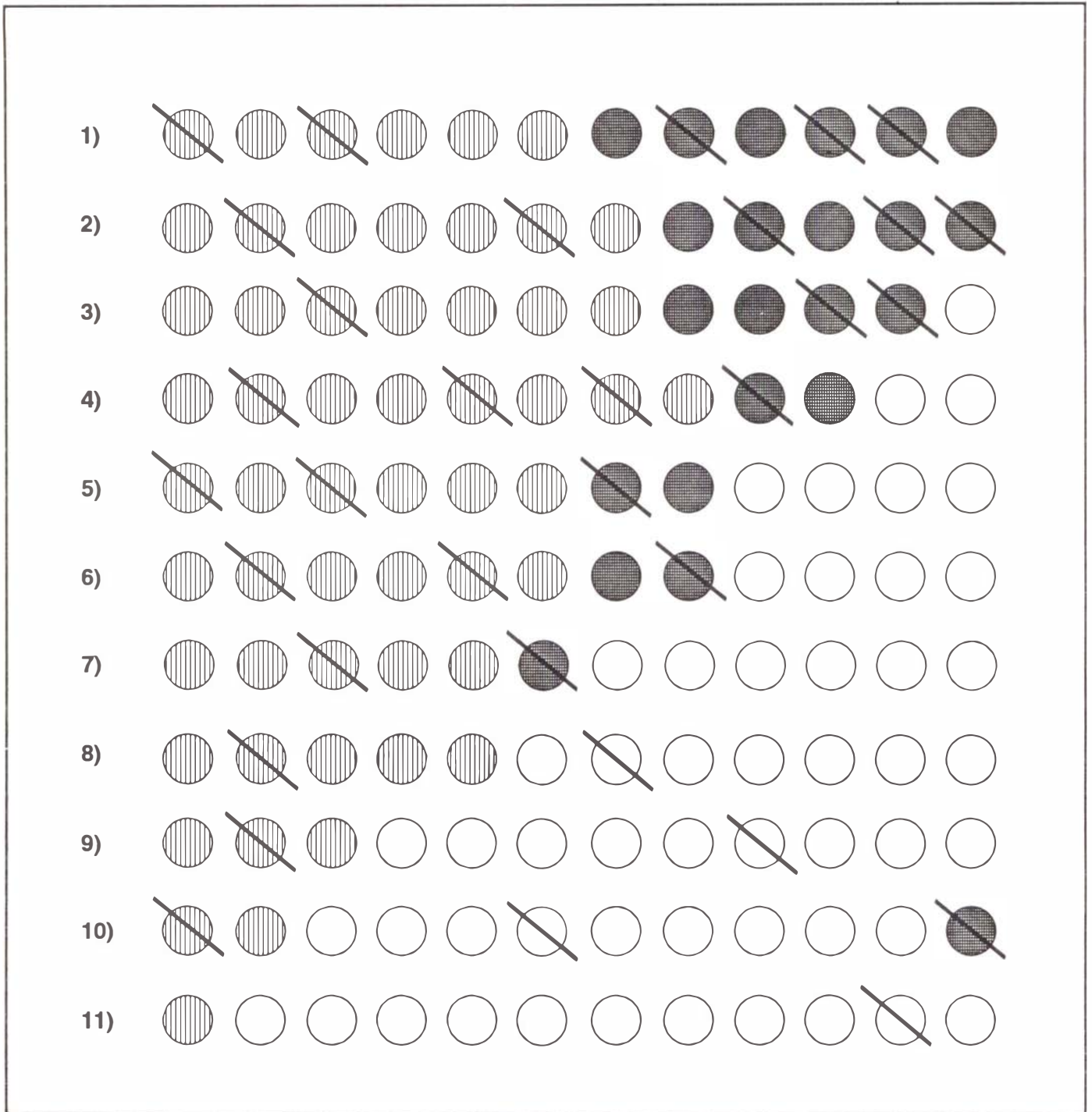


Figura 1. La compra de taronges o la reproducció de l'ós polar? La columna de l'esquerra representa les setmanes (o les generacions d'óssos). Els discos ratllats representen les taronges del primer venedor (o els óssos bruns); els que tenen una retícula, les taronges del segon venedor (o els óssos rojos); i els discos blancs, les taronges del tercer venedor (o els óssos blancs)

tant, busca pel mercat, encara que només sigui per veure si cap dels venedors a qui ha deixat de comprar des de fa temps ha millorat la qualitat. Els resultats de les onze primeres setmanes estan representats a la Figura 1; s'hi veu que el tercer venedor sembla oferir les taro de millor qualitat mitjana, i a la fi d'aquest període és pràcticament l'únic proveïdor.

Segurament vostè deu tenir una certa experiència de comprar ta-

ronges al mercat i somriurà pensant que algú pugui actuar com ho fa la nostra compradora. Ara bé, voldria tan sols remarcar que ella utilitza un parell de principis molt bàsics. Són els següents:

1) *provar més d'allò que fins ara ha resultat més satisfactori*, i 2) *experimentar, de tant en tant, per veure si hi ha opcions millors o si s'ha comès un error no considerant alguna opció ja coneguda*.

Aquests principis bàsics es poden

matisar -per exemple, l'experimentació pot anar disminuint amb l'experiència-; però, ¿és que no il.lustren prou clarament el nostre procés quotidià d'aprenentatge?; com decidim quina és la beguda que preferim?, o la música que ens agrada més?, etc.

Però darrera del caràcter intuïtiu que tenen, aquests principis amaguen un resultat teòric bastant profund. Hi ha un problema molt famós en la teoria del control òptim, anomenat el problema de les *dues màquines escurabutxaques*. En un casino es vol apostar durant un temps indefinit i en cada moment s'ha de triar entre dues màquines escurabutxaques. Com passa amb les taronges, es desconeix quina és la màquina en què hi ha una probabilitat més gran de guanyar.

J. Holland ha demostrat que si el jugador és pacient, la millor manera d'anar apostant és seguir un procés molt semblant al que s'ha descrit fent referència a les taronges; és a dir, jugar amb totes dues màquines proporcionalment als beneficis obtinguts per cada una. En altres paraules, la nostra compradora potser es guia per intuïció, però de fet resol satisfactòriament un problema molt complex d'optimització.

És el moment de mirar cap a la natura i parlar, per exemple, de l'ós polar. A les regions de l'àrtic l'ós és un animal depredador que s'alimenta de pingüins. L'habilitat que té a camuflar-se és important en el moment d'agafar per sorpresa una presa. Ara bé, ni tots els óssos han estat o són blancs, ni les estepes han estat o estan sempre gelades (amb una petita excepció polar). En principi podríem pensar en una gamma de pigmentacions, per exemple, óssos bruns, óssos rojos (per què no?), óssos blancs, etc. Els óssos amb una més gran capacitat de camuflatge tindran una capacitat més gran per sobreviure i reproduir-se. La Figura 1 descriu ara una possible evolució d'una població de dotze óssos polars partint de dues pigmentacions tan poc adequades com la terrosa i la roja. La descripció

és molt simplificada, com ho era la de la compra de taronges. Així veiem que tan sols hi ha dotze óssos per cada generació i els que no es reproduïen per falta d'adaptació al medi (marcats amb una ratlla) són substituïts per altres de més ben adaptats. Operacions genètiques com l'encreuament i, en menor grau, la mutació hi fan possible l'experimentació. Després d'un procés més o menys llarg, veiem com, i per què, els óssos blancs són dominants a l'àrtic.

No pretenc pas ser un expert en biologia o filosofar. Ara, crec que els exemples de les taronges i dels óssos són ben il.lustratius. Sovint es malentén la teoria evolucionista com si aquesta postulés que les espècies, o els gens, persegueixen un objectiu clar i tenen voluntat i capacitat per fer-ho. És ben clar que

■ La senyora que compra taronjes o els gens acaben actuant d'una manera òptima

no és així, tot i que, com la senyora que compra taronges, les espècies (o els gens) acabin actuant d'una manera que es podria dir òptima. És cert que la senyora té un objectiu ben definit, i segurament n'és conscient. Ara bé, ¿és conscient que resol un problema complex d'optimització? O, més aviat, ha après a aprendre per experiència? Experiència que potser es remunta a la infància i a una llarga cadena d'avantpassats.

I, ¿QUÈ TENEN A VEURE ELS ÓSSOS POLARS AMB LES PRÒXIMES GENERACIONS DE ROBOTS?

La Intel·ligència Artificial (IA) és un altre camp en què no sóc expert, però m'hi vull referir breument. Una part de la recerca en IA s'ha centrat a desenvolupar els anomenats *sistemes experts* i, d'aquí ve la imatge de robots fabricant cotxes d'alta tecnologia. Els sistemes experts són programes (o programes amb braços mecànics!) projectats per fer una tasca molt concreta. El problema que té aquest tipus d'intel·ligència artificial és que sovint hi ha incidents o modificacions de les tasques previstes i sense la intervenció humana per reprogramar-lo, el sistema expert es converteix en un sistema inoperant. S'ha de fer un pas més enllà i projectar màquines (programes) capaces d'aprendre per si mateixes. Aquesta és una tasca molt complexa, i en aquest punt els experts en intel·ligència artificial han mirat a la natura. Els uns, per desenvolupar mètodes basats en models neurològics del cervell (*neural networks*); els altres, amb J. Holland al capdavant, desenvolupant algorismes basats en el procés d'evolució biològica com a procés d'aprenentatge (*genetic algorithms* i *classifier systems*). Els anomenats algorismes genètics es basen en els mateixos principis que hem vist quan parlàvem de l'aprenentatge de la nostra compradora de taronges. És a dir, el meu ordinador (que és ple d'aquest tipus d'algorismes) és capaç d'aprendre a comprar taronges o a fer altres tasques més sofisticades que requereixen aprendre una tasca en un entorn desconegut.

COMPETÈNCIA GENÈTICA I COMPETÈNCIA ECONÒMICA

El comportament d'un ésser viu, el mediatitza el comportament d'altres éssers vius del seu entorn; el pingüí, la presència de l'ós a la riba i l'empresari, la presència d'altres empreses en la indústria. Sovint,

això dificulta enormement el problema de trobar solucions adequades en entorns desconeguts.

Suposem, per exemple, que els nostres venedors de taronges canvien la qualitat de les taronges segons el nombre de compradors; oferint una gran qualitat quan hi ha pocs clients i rebaixant-la quan els sembla que ja tenen una clientela garantida. El problema de trobar la millor qualitat mitjana ja no tindria cap solució independent del que fessin els compradors i, segurament, el nom (color) de qui ofereix la millor qualitat aniria fluctuant. Però, a més a més, el nombre total de compradors és important en aquest cas. Si n'hi ha molts, la nostra compradora veurà fluctuar la qualitat i haurà de seguir aquests canvis. Si n'hi ha pocs, se li planteja a la senyora un problema addicional: decidint comprar a un venedor pot influir en la qualitat futura de les taronges ofertes per aquest venedor.

La teoria dels jocs estudia les solucions a què s'arriba (es pot arribar) quan hi ha interrelació entre diferents agents. Desenvolupada en principi per analitzar comportaments econòmics, també s'ha aplicat a l'estudi de la teoria darwiniana de l'evolució. John Maynard Smith ha estat un dels pioners d'aquesta aplicació. El seu exemple més famós és el de la competència entre comportaments agressius i defensius; entre *falcons* i *coloms*. La Figura 2a representa els resultats possibles d'un enfrontament entre dos ocells que competeixen per una presa comuna. Si dos falcons s'enfronten, la lluita és tan violenta que tot i que al final es reparteixin la presa, tots dos hi perden (cadascun perd 1). En canvi si un falcó s'enfronta a un colom, com que aquest no presenta batalla, el falcó guanya la presa (guanya 2) i el colom no hi perd res (es queda amb 0). I si dos coloms s'enfronten, com que no lluiten, es limiten a repartir-se la presa (cadascun guanya 1).

La teoria de l'equilibri de Nash prediu que hi ha tres solucions o

	Falcó	Colom		Preus baixos	Preus alts	
Falcó	-1, -1	2, 0		Preus baixos	-1, -1	2, 0
Colom	0, 2	1, 1		Preus alts	0, 2	1, 1
	Figura 2a.			Figura 2b.		

equilibris possibles en un joc com el que representem a la Figura 2a. Les dues primeres són Falcó-Colom i Colom-Falcó ja que si un es pensa que l'altre agent es comportarà d'una manera agressiva (defensiva), és millor que es comporti d'una manera defensiva (agressiva). Hi ha un altra solució, que és decidir a l'atzar - per exemple, llançant una moneda enlaire - si comportar-se agressivament o defensivament amb la mateixa probabilitat. Havent-hi tres solucions, la teoria de l'equilibri de Nash no té gaire poder predictiu en aquest exemple.

Potser el lector es preguntaria per la capacitat de raonar o llançar monedes enlaire que tenen els ocells (com Einstein va dir: "Déu no juga als daus"). Ara bé, la supervivència i reproducció d'una espècie d'ocells depèn de l'habilitat que tingui a competir amb altres espècies. En una població d'ocells, la probabilitat que un falcó es trobi amb un altre falcó depèn de la proporció que hi hagi de falcons. D'altra banda, en una població composta majoritàriament de coloms, els falcons tindran tendència a reproduir-se més ràpidament. Resulta, doncs, que l'única solució estable en aquest procés de competència entre les dues espècies és la població composta la meitat de coloms i la meitat de falcons, corresponent a la solució mixta de Nash.

La Figura 2b representa el conflicte entre dos venedors de taronges que han de decidir posar preus alts o baixos. Si l'un posa preus baixos quan l'altre posa preus alts, el primer incrementa la clientela que té (guanya 2) i el segon es queda amb uns pocs clients local a qui els costa de desplaçar-se (guanya 0). En canvi, tots dos hi guanyen si tots dos posen preus alts i dos hi perden si posen preus baixos.

Com el lector haurà notat, no hi he canviat més que els noms: és el mateix joc i hi ha els mateixos equilibris de Nash. Ara bé, quina és la millor estratègia a seguir? Dependrà del que un cregui que l'altre farà. Però, d'on surten aquestes creences? És raonable pensar que ho hagi après per experiència. Per exemple, es pot pensar que el seu competidor posarà possiblement preus alts si això és el que ha fet la majoria de vegades en el passat. De fet, un venedor pot guiar-se per l'experiència encara que només vegi i recordi el resultat de les seves pròpies accions.

Posem que tots dos venedors començaven llançant - d'una manera independent - monedes enlaire per decidir si cal posar preus alts o baixos (d'acord amb la solució mixta de Nash) i que posteriorment decidien posar preus baixos o alts amb una probabilitat major o menor dependent dels resultats obtinguts amb les dues estratègies. Per exemple, si

	C	I		C	I
C	10, 10	0, 0	C	10, 10	0, 7
I	0, 0	8, 8	I	7, 0	8, 8

Figura 3a.

Figura 3b.

posant preus alts els guanys acumulats han estat 60 i posant preus baixos, 40, aleshores posar preus alts té una probabilitat 0,6.

Seguint un procés d'aquesta mena pot passar molt ràpidament que un venedor es converteixi en l'agressiu (preus baixos) i l'altre en el defensiú (preus alts). Així, encara que tots dos venedors comencin igual, al cap de poc temps es poden comportar molt distintament.

Veiem, doncs, que, tot i que l'evolució de dues espècies d'ocells i el procés d'aprenentatge de dos competidors segueixen principis molt semblants, en jocs que formalment són iguals, els resultats són molt diferents. La diferència rau en això: així com en el primer cas la composició de la població d'ocells varia, en el segon el nombre de jugadors no ho fa: tan sols varia el que ells creuen. Però en tots dos casos, considerant el procés dinàmic (d'evolució o d'aprenentatge) hem pogut ser molt més precisos sobre les prediccions de la teoria dels jocs.

EL CREADOR I EL PLANIFICADOR

Entre els evolucionistes i els creacionistes hi ha hagut diatribes, de la mateixa manera que entre els economistes clàssics i els que han vist en *el laissez faire* l'origen de tots els mals del capitalisme i que constantment han advocat per l'exis-

tència d'un planificador (això era abans de la caiguda de l'imperi soviètic) o per la intervenció de l'Estat. Aquests avenços recents de la teoria dels jocs ens fan veure aquests problemes amb més maduresa. Els dos últims exemples ens poden servir d'il·lustració. La Figura 3 ens mostra dos jocs entre dos jugadors que poden o bé *cooperar* (C) o bé actuar de manera *individual* (I). En tots dos jocs el fet que dos agents cooperin o actuïn individualment és un equilibri de Nash -la teoria ens diu ben poca cosa. Un bon creador o planificador els aconsellaria que cooperessin. Però si els dos agents actuen *cegament* veient només els resultats de les seves accions i, això sí, aprenent-ne, quin resultat esperem obtenir? Per exemple, si al principi tots dos proven les dues estratègies amb la mateixa freqüència i a partir d'un cert moment es guien pel principi de jugar més amb l'estratègia que ha donat els millors resultats fins aleshores, resulta que en el joc de la Figura 3a els dos jugadors acaben cooperant, mentre que en el joc de la Figura 3b els dos jugadors acaben actuant de manera individual. En aquest últim joc, els avantatges d'actuar individualment quan l'altre agent es presta a cooperar reforcen la solució individual. Deixo al lector que busqui situacions en economia i en biologia semblants a les que descriuen els exemples de la Figura

3b, i que es preguntin aleshores: On és el creador? i quin és el paper del planificador?

UN OBJECTE D'ESTUDI COMÚ: ELS AGENTS MÉS O MENYS RACIONALS

Com s'assenyala en diversos articles d'aquesta sèrie, la teoria de l'equilibri de Nash té un problema: l'existència de múltiples equilibris o solucions, cosa que deixa la teoria sense poder predictiu. D'altra banda, algunes d'aquestes solucions no sembla pas que s'observin en la pràctica.

L'apogeu recent de les teories evolutives i de l'aprenentatge prové, en part, de l'interès per desenvolupar una teoria dels jocs que, prestant més atenció als processos de decisió i d'aprenentatge, tingui més poder predictiu. Com veiem, aquesta teoria general pot ser molt útil a biòlegs i economistes. Ara bé, si sortim dels exemples més senzills, els jocs dinàmics entre múltiples agents són difícils de solucionar.

Però, com hem vist quan parlàvem del problema de l'aprenentatge d'un sol agent, es pot simular el comportament d'agents econòmics (o d'espècies) per mitjà d'*agents amb intel·ligència artificial*. Així dotem l'IA d'una dimensió que no tenia (l'aprenentatge interrelacionat) i utilitzem aquest desenvolupament de l'IA per aprendre sobre el comportament biològic o econòmic. ■

Ramon Marimon

és Assistant Professor de la University of Minnesota, coordinador de la Facultat d'Econòmiques i Empresariales de la Universitat Pompeu Fabra i professor visitant de l'Institut d'Anàlisi Econòmica del CSIC, del Santa Fe Institute i de la Hoover Institution de Stanford University (EUA).