

Modelització i simulació aplicades a la recerca i interpretació de camps de batalla

Xavier Rubio Campillo

Director de Tesi: Francesc Xavier Hernández Cardona

Programa de Doctorat en Didàctica de les Ciències Socials i del Patrimoni

Bienni 2005-2007

Universitat de Barcelona

Març 2009

Capítol 3

Modelització i simulació

En aquest capítol definirem el concepte de la modelització matemàtica, així com els motius pels quals pot ser una bona metodologia de treball dins les Ciències Socials i, més concretament, dins la Didàctica de la Història. A més, definim el concepte de simulació, i la seva utilitat en l'experimentació, creació i validació d'hipòtesis, tot fent servir un model dissenyat anteriorment.

L'apartat següent explora la creació d'un model apte per a fer-se servir en un entorn científic a través de simulacions, així com el potencial que aquest sistema pugui tenir en quant a Didàctica es refereix.

Finalment, definim els tres factors principals que qualsevol modelització d'un conflicte armat ha de contemplar, tot destacant les casuístiques i l'estat actual de recerca al voltant dels mateixos.

3.1 Un model per a entendre el món

Un model és tot aquell concepte, relació o objecte que s'utilitza per a representar i estudiar de forma simple i comprensible una porció de la realitat empírica. Quan substituïm un concepte per una paraula estem fent servir un model, al igual que quan consultem la hora en un rellotge, que és un model del moviment de la Terra sobre el seu propi eix. Per tant, per tal d'obtenir un coneixement objectiu i empíric és necessari establir un model que permeti explicar la realitat que ens envolta.

De fet, la modelització (sigui física, matemàtica, virtual, etc.) dels fenòmens que ens envolten resta a la base de tota la història del coneixement humà, essent en concret el pilar que fonamenta tot el coneixement científic, així com la seva aplicació mitjançant les disciplines tècniques més diverses: arquitectura, enginyeria, informàtica, etc.

En molts casos els models més útils són els matemàtics, doncs aquests permeten crear una imatge útil del nostre entorn i, estant expressats com a formulacions matemàtiques, tenen tots els avantatges d'aquest llenguatge per a establir relacions entre els elements del model i fer càlculs amb els mateixos.

Així doncs, som capaços de definir un model de qualsevol element que ens envolti, i en el mateix podem definir a través de les matemàtiques el principi de causa i conseqüència, que dóna sentit al nostre univers. Per tant, seria possible predir el que passarà en el futur, en el cas que aconseguim definir un model suficientment encertat?

La resposta a aquesta pregunta, de fet, és negativa¹, però de totes maneres l'ésser humà ha descobert que un model prou acurat i complex pot ser enormement útil, tot i les seves necessàries simplificacions. Només cal parar-se a pensar en un plànol d'arquitectura, els túnels de vent emprats en la construcció de cotxes, o les recreacions virtuals fetes servir en medicina per tal d'entendre que, tot i no ser una representació perfecta de la realitat, segueixen essent indispensables en les seves respectives tasques.

En concret, la modelització matemàtica és un procés mental que es basa en convertir un problema opac de la realitat en un problema clarificat a través del llenguatge matemàtic, de tal manera que resolent aquest problema simplificat puguem aconseguir la solució, o com a mínim una bona aproximació, al primer (Ríos 1995, p. 17). Així, la formulació d'un model matemàtic és un conjunt complet i consistent d'equacions matemàtiques pensades per a correspondre a una altra entitat, és a dir, el seu prototipus (Aris 1978, p. 1). Aquest prototipus, d'altra banda, pot ser de

¹Podríem citar entre altres factors el principi d'incertesa d'Heisenberg, així com l'enorme complexitat inherent a tot el que ens envolta.

qualsevol àmbit: físic, químic, social, geogràfic, etc.

L'ús de models matemàtics, iniciat al segle XVIII i confirmat com a sistema de coneixement a partir del segle XX, implica un canvi conceptual radical en quant a la manera de concebre el món, ja que es passa d'intentar assolir el coneixement sobre com funciona la realitat a intentar definir un model matemàtic que l'expliqui de forma convincent, sense entrar en el debat si aquesta realitat és matemàtica o no ho és.

Una conseqüència important d'aquesta discussió epistemològica és el fet que poden conviure models matemàtics que siguin contradictoris; mentre cadascun d'ells sigui útil per a analitzar i entendre una part del món real, no serà un problema important que donin aproximacions diferents dels mateixos fenòmens. Així, actualment la llum té dos models diferenciats per a explicar-la (la teoria corpuscular i la ondulatoria). Paradoxalment són dos models clarament incompatibles, ja que si la llum és una ona no pot estar composta de partícules, i viceversa. Malgrat tot, són teories que es fan servir en casos diferenciats, en els quals demostren la seva validesa per a explicar el comportament d'aquest fenomen físic².

És un fet que aquesta modalitat de gestió del coneixement s'ha anat imposant en els últims segles de manera general en la gran majoria de camps científics, ja que a banda de permetre entendre la realitat, un model matemàtic donat es pot anar millorant i refinant a mesura que obtenim dades noves que afegixin al seu torn nous interrogants. Quan això passa, el model queda obsolet i els científics intenten buscar-ne un de nou que, prenent com a base el coneixement ja adquirit anteriorment, permeti respondre les noves preguntes.

²Un exemple més complicat és el de la física quàntica i la teoria de la relativitat. Mentre que la primera explica en gran mesura el comportament de les partícules atòmiques i subatòmiques, el segon serveix per a interpretar les forces físiques a escala universal. El problema és que, quan tots dos mons s'uneixen, cap de les dues aconsegueix explicar el problema en la seva totalitat, com passa en el cas de la teoria del Big Bang, a on tot l'univers està comprimit per un període de temps donat fins a nivell partícules atòmic. Com a conseqüència en les últimes dècades s'ha perseguit la creació d'un model matemàtic que expliqui tots els fenòmens, l'anomenada teoria del tot o teoria del camp unificat (Greene 2006).

A tall d'exemple, les 3 lleis newtonianes que definien la interacció entre els diversos objectes de l'univers són hereves dels treballs iniciats entre d'altres per Galileo Galilei, com va reivindicar el propi Isaac Newton. A la seva vegada, 200 anys després de la formulació dels *Principia* newtonians Albert Einstein va aconseguir explicar nous events detectats a l'univers que no podien ser explicats pel coneixement anterior, mitjançant les seves teories de la relativitat (especial i general). Així doncs, la modelització de la realitat ens permet establir el nostre coneixement d'una manera molt eficient, tot compartint-lo a través d'un idioma comú i pràctic com són les matemàtiques.

3.1.1 Tipologies de models

Tenint en compte aquestes característiques, podem definir una primera classificació que ens ajudi a veure quins models s'han anat generant al llarg dels anys. D'aquesta manera podrem començar a veure com són susceptibles d'aplicar-se en la Didàctica de les Ciències Socials, i en concret, en la interpretació dels conflictes armats.

- Models verbals i analogies mecàniques. En el primer nivell de complexitat, com a mínim pel que fa al contingut matemàtic, trobem els models que no formen part estrictament de la matemàtica pura, tot i que en poden fer ús. Aquests models, altraments coneguts com a models *tous*³, són molt abundants en les Ciències Socials, ja que en aquest entorn és extraordinàriament difícil fer la mena de raonaments i suposicions típiques d'un altre tipus de model.
- Models finits. Dins aquesta tipologia trobem una varietat considerable d'aplicacions. Totes, però, es basen en el mateix concepte, conegut com a graf. Un graf consisteix en una col·lecció de nodes units per línies, conegudes com a arestes. Tot i que pugui semblar trivial, el disseny de models a partir de la teoria de grafes és extremadament complex a causa dels diversos problemes de connectivitat que la topografia d'un graf determinat pot tenir. La mateixa

³En contraposició als models *durs*, que basen la totalitat de la seva exposició en equacions matemàtiques, amb prediccions quantitatives exactes o conceptes definits de manera estricta.

simplicitat del complexe permet que pugui modelar prototipus tan diferents com la geografia del terreny, la presa de decisions a partir de la teoria de jocs, la xarxa d'internet o, si ens centrem en la recerca històrica, la xarxa logística d'un exèrcit (Wagstaff 2006). Un cop analitzat un problema a partir de grafs, hi ha diversos algorismes que permeten resoldre temes com les rutes més eficients entre dos nodes, donat costos diferents en cada node, saber si d'un node origen O es pot arribar a un node destí D , etc.

- Subconjunts difusos. Els models difusos (altrament dits *fuzzy*) són emprats en situacions a on les típiques funcions que donen un resultat concret per a cada entrada no tipifiquen correctament el comportament que es vol interpretar. Per contra, els models de subconjunts difusos permeten que per cada entrada hi hagi diverses sortides possibles, tot simulant fins a cert punt un component d'incertesa i treballant a partir d'integrals. Això ha fet que es popularitzi el concepte en camps a on el concepte d'incertesa sigui rellevant, com per exemple en biologia, mediambient o processament del llenguatge natural.
- Models estadístics. Aquest tipus es dissenya al voltant d'una variable d'entrada que produeix resultats que, malgrat semblar a priori aleatoris, poden tenir algun tipus de patró. Això permet dissenyar una funció de densitat de probabilitats, que serveixi per a interpretar la distribució dels resultats i extreure'n conclusions.
- Equacions diferencials. Aquest és el model més habitual en quant a l'aplicació en ciències experimentals es refereix. És idoni per a modelar prototipus que tenen un comportament continu (aquells en els quals trobem infinits valors entre cada valor). El problema d'aquests sistemes és que són més complicats de resoldre en entorns computeritzats que no pas, per exemple, els models finits. Així, per a resoldre una equació diferencial en un ordinador cal discretitzar-la abans, ja que l'ordinador és un entorn determinista i discret i, per tant, els programes que s'hi executin també ho han de ser.
- Models estocàstics. Aquesta tipologia uneix la resolució de sistemes d'equaci-

ons a partir d'integrals (típics dels subconjunts difusos) amb la modelització de variables aleatòries a partir de funcions de densitat de probabilitats (pròpia dels models estadístics).

3.2 La modelització matemàtica com a metodologia

Un cop definit el que és un model caldrà especificar els seus elements, així com el que comporta el seu ús com a metodologia científica

El model matemàtic és la representació a nivell abstracte d'un prototipus determinat. Algunes de les particularitats del prototipus hauran estat simplificades o bé eliminades, però cal destacar que des d'un punt de vista lògic no podem dir que el model sigui menys real que el prototipus⁴. Seguint aquesta perspectiva, útil per a la formulació del model, el prototipus és una entitat en la qual se satisfan amb un cert grau de validesa les premisses extremes del model. Cal destacar que, per força, aquest prototipus està menys definit que no pas el model. Aquest últim té uns límits ben definits (tot i que escollits de manera arbitrària per l'investigador), però mitjançant aquesta delimitació ens trobem amb un dels problemes de la modelització, i és el fet que estem descartant de manera apriorística un conjunt de forces que, segons nosaltres, no són rellevants per al problema que estem intentant resoldre, tot i que no hi ha cap prova del contrari (Bratley, Fox, i Schrage 1987, pp. 1-2).

Podem definir, en aquest sentit, la modelització matemàtica com a un sistema d'equacions Σ que és una representació vàlida del sistema prototipus S en la mesura en la que Σ és capaç de formular adequadament les lleis que regeixen S , i la seva solució representa algun aspecte del comportament de S .

Si fem servir la modelització com a una metodologia necessitem establir de manera clara l'objectiu de la mateixa, és a dir, el propòsit pel qual l'estem dissenyant. Cal destacar, en aquest sentit, que l'ús de models en la construcció de teories proporciona un excel·lent mecanisme per a la formulació d'hipòtesis, motiu pel qual l'ús de la modelització matemàtica pot permetre generar hipòtesis al voltant de l'objecte

⁴De fet, el prototipus podria ser un altre model matemàtic.

d'estudi i, encara més, comprovar la seva validesa a partir de l'aplicació dels resultats aportats al prototipus (Aris 1978, p. 7).

Per tal que sigui útil en quant a metodologia d'investigació, la modelització matemàtica ha de constar de les següents fases (Ríos 1995, pp. 28-32; Klamkin 1987, p. 3; Aris 1978, pp. 22-23):

1. Descripció del problema, sistema o fenomen real. En aquesta primera fase plantegem el problema que volem resoldre, essent aquest tan simple o complex com es vulgui.
2. Obtenció d'informació. El següent pas és la recopilació de dades sobre el problema que estem intentant resoldre.
3. Model empíric de relacions. Un cop reunida tota la informació, hem d'establir les relacions que es donen entre els diferents elements del sistema.
4. Conceptualització. En aquesta etapa es destriem els conceptes que creguem importants del sistema, i que per tant farem servir en el model matemàtic.
5. Creació del model matemàtic concret. Un cop identificats els conceptes bàsics del sistema, així com les relacions entre els mateixos, podem ja formular el model matemàtic que reflecteixi de forma correcta la problemàtica que volem tractar.
6. Procés lògic deductiu. Crear un model matemàtic és una tasca valuosa per sí mateixa, doncs està clar que la recollida d'informació i l'anàlisi dels passos anteriors poden aportar llum pel que fa al problema estudiat. Malgrat tot, podem anar un pas més enllà, i aplicar aquest model matemàtic a casos concrets.
7. Computació. Després d'haver fet el model, i tot aplicant el procés esmentat, podem arribar a extreure resultats del mateix. És a dir, quan s'ha trobat una manera donar solució al problema cal computar-la, cosa que normalment implicarà l'ús de potència d'ordinador.

8. Desconceptualització. Un cop extrets aquests resultats, caldrà transportar-los al món real.
9. Relacions empíriques. Finalment cal comprovar si els resultats obtinguts amb els càlculs del model matemàtic s'adiuen a la realitat, a partir d'experimentació empírica.

És evident que, d'una banda, difícilment dissenyarem un bon model matemàtic si ens falta la base teòrica requerida sobre el problema a tractar. És a dir, per a seleccionar les variables destacades del nostre model, així com les relacions imperants entre les mateixes, necessitem d'un bon coneixement del tema que estem intentant resoldre. Al mateix temps, aquest coneixement anirà variant a mesura que avança el procés, de tal manera que el model s'anirà refinant amb noves idees fruit dels seus mateixos resultats.

D'altra banda, aquest marc de treball variarà en funció del sistema al qual l'estiguem aplicant. Així, mentre que el procés de resolució és abstracte en quant a matemàtiques pures es refereix, si l'estem aplicant a física o química aquesta fase requerirà dels següents punts:

- Disseny d'un experiment
- Execució
- Avaluació i interpretació

És a dir, per a modelitzar un problema relacionat amb ciències experimentals caldrà dissenyar un experiment empíric per a resoldre les últimes fases del procés. Aquest experiment pot ser extraordinàriament variat, però sempre ha d'intentar comprovar que les hipòtesis fetes durant el procés lògic deductiu són certes en el prototipus. Enlloc de fer un experiment al món real, algunes vegades és necessari emprar altre tipus de tècniques, com per exemple la simulació informàtica, que explicarem detalladament més endavant.

D'altra banda, aquest procés no és una fletxa que avança en una sola direcció. Des d'un inici, i contra més avancem en la conceptualització del model, estretem un

camí que fins aleshores pot haver estat molt ampli, doncs l'investigador està obligat a explorar moltes de les possibilitats al seu abast. Per tant, la consecució d'un model vàlid no implica necessàriament un increment en la complexitat del mateix (Aris 1978, p. 23).

Pel que fa a la validesa del model, no és un assumpte trivial. Una de les proves que un model és correcte és el fet que sigui capaç d'integrar dades provinents de fonts independents entre sí, tot combinant-les per a generar una imatge global definida i correcta.

3.3 Modelització en Ciències Socials

Centrant-nos en el camp d'aquest estudi, les capacitats de la modelització matemàtica no han estat gaire emprades en les Ciències Socials, a excepció feta de l'Economia i la Sociologia. Aquest dèficit pot estar relacionat amb el fet que els sistemes socials presenten una complexitat molt alta per a la formulació de models matemàtics que tinguin suficient interès pràctic. Els models matemàtics habituals estan basats en la utilització d'equacions diferencials que, tot i ser molt aptes per a l'estudi de sistemes continus, no ho són tant pel que respecta a entorns a on el que importa principalment és la interrelació entre elements discrets, com poden ser els éssers humans⁵.

Per aquest motiu la eina matemàtica emprada en la majoria d'investigacions relacionades amb Ciències Socials és l'estadística, que permet extreure determinats patrons a partir de nombroses mostres d'una mateixa variable. Incorporada al segle XIX a l'estudi de la societat per Adolphe Quetelet, l'estadística ha proliferat en gairebé totes les Ciències Socials com a una poderosa eina d'anàlisi (Stewart 2007, pp. 68-72). Donades les dificultats per aplicar equacions diferencials, les eines proporcionades per l'estadística permeten extreure patrons generalitzables a partir de un conjunt de dades finit i que, a priori, sovint no mostra cap mena de compor-

⁵Això no vol dir que no sigui possible de fer, ja que nombrosos models diferencials estan orientats a la resolució d'aquest tipus de problemes. Malgrat tot, una aproximació basada en elements discrets autònoms sembla, a priori, molt més intuïtiva.

tament regular. És fàcil veure el motiu pel qual aquesta tècnica és tan usada en Ciències Socials, ja que aquesta mena d'estudis s'adapten molt millor als problemes relacionats amb l'ésser humà i les seves societats que no pas els altres (Carnap, Morgenstern, i Norbert Wiener 1974, pp. 11-86).

El principal desavantatge d'aquesta eina és que l'estudi estadístic no comporta cap model matemàtic complet a l'estil dels que tindriem en Ciències Físiques; per contra, obtenim un conjunt de tendències extrems a partir de mostres d'una variable determinada i, per tant, la quantitat d'informació que podem generar és molt més limitada (particularment en relació a la predictibilitat del sistema i la comprovació d'hipòtesis).

Així, la utilització de models matemàtics en Ciències Socials té com a problema principal la complexitat dels sistemes que tracten aquestes disciplines; els sistemes físics o químics, per exemple, es poden modelar de manera més senzilla que una relació entre humans.

Existeixen, com a conseqüència, dos problemes bàsics. Per una banda, els models matemàtics clàssics no són vàlids per a intentar crear marcs de referència a l'entorn de qüestions socials. Així, les característiques particular de les ciències que tractin amb l'ésser humà i les seves decisions són difícilment assimilables als models tradicionals si el que estem cercant és la resolució de problemes determinats. Cadascun dels membres de la societat (o bé d'una part de la mateixa) és únic i, per tant, no es comporta de la mateixa manera, tenint tots els actors implicats uns objectius, interaccions i accions diferents dels de la resta. Per tant, cal fer servir aproximacions diferents de les que es podran adoptar en el cas de les Ciències Experimentals.

En paraules d'un dels creadors de la teoria de jocs (Carnap, Morgenstern, i Norbert Wiener 1974, p. 190):

No tiene la economía actual un modelo adecuado en la mecánica, con sus nociones de fuerza, de equilibrio y de estabilidad? En efecto, la física sirve de base a muchos esfuerzos realizados para lograr una explicación del comportamiento económico racional, tanto si se trata de llegar a una formulación matemática como si no. Pero muchas situaciones im-

portantes que se manifiestan a todos los niveles de economía no tienen contrapartida alguna en la física.

Aquestes situacions són aquelles en les quals entren en joc diverses persones o col·lectius, cadascun dels quals té una sèrie d'objectius, informació i accions al seu abast, a partir dels quals haurà de triar una opció determinada. És evident que aquesta aproximació, útil per a l'Economia com deia Oskar Morgenstern, també pot servir per a la resta de Ciències Socials; per definició aquestes tractaran problemes relacionats amb el comportament social humà, en els quals estan integrats els relacionats amb els recursos i l'economia.

D'altra banda, el mateix raonament indica que quan s'han emprat models matemàtics en les Ciències Socials amb caràcter predictiu el resultat no ha estat satisfactori, ja que s'han aconseguit a partir de simplificacions tan radicals que els seus resultats i aproximacions no han estat ni vàlids ni útils en quant a la seva translació al món real.

Si observem de nou els passos a seguir al realitzar un model, podem dir que els errors radiquen en quatre fases diferenciades. Les dues primeres són la detecció de relacions i la conceptualització, ja que al intentar definir el model a partir de la detecció de variables no es tenen totes en compte, són conceptualitzades de manera errònia dins el nostre model, o ara bé les relacions entre elles no funcionen com ho haurien de fer. La tercera és la creació del model matemàtic concret, ja que al desconèixer com s'ha de modelar un sistema complex com el que estem intentant tractar, la manera segons la qual aquest serà modelat no serà l'aproximació més correcta. Finalment, la desconceptualització és la fase més crítica, doncs encara que es creï un model matemàtic que funcioni a priori, si no s'han definit les seves variables de manera correcta amb la realitat, al intentar aplicar els resultats del model a aquesta trobarem que tot el procés no ha funcionat.

Aquesta dicotomia, d'altra banda, també pot estar relacionada amb altres factors. Un d'ells és la profunda bretxa existent entre les ciències experimentals i les ciències humanes. En un principi aquestes diferències, resumides en el concepte de les *dues cultures*, es deuen a un problema de coneixements diferenciats (Snow 1977).

Mentre les primeres s'expressen com a fórmules matemàtiques, i intenten assolir el coneixement a partir de models deterministes dels problemes, les segones estan dominades per la incertesa. Així, mentre que, com hem dit, la física o la química s'ocupen de fenòmens més aviat simples, l'economia o la didàctica han de tractar problemes complexos⁶.

Malgrat tot, la diferència no és, actualment, tant important com sembla. La complexitat dels sistemes estudiats en física i química és cada cop més gran, ja que s'està descobrint que el mateix concepte d'incertesa que mencionàvem en parlar de les ciències humanes és necessari per a modelar determinats processos a nivell subatòmic (Prigogine 2008, pp. 14-16). D'altra banda, des de fa unes dècades van sorgint diferents models matemàtics que, tot i no ser tan complets com els fets servir en ciències experimentals, comencen a ser útils per a les Ciències Socials en quant a estudi de l'ésser humà es refereix.

Totes aquestes discussions sobre la relació entre complexitat i simplicitat estan resumides en les apreciacions fetes pels propis matemàtics purs al voltant del descobriment, durant els anys 70, de la matemàtica del caos (Stewart 2007, pp. 7-8):

Otros científicos, sin embargo, tuvieron más imaginación. Podían ver que lo que los matemáticos estaban aprendiendo acerca del caos podría tener profundas implicaciones para prácticamente cualquier área de la ciencia (y posiblemente también para las humanidades, el comercio y las artes). Los detalles eran menos importantes que el impacto filosófico. Reglas simples pueden dar lugar a un comportamiento complejo. Conocer las ecuaciones para un sistema no significa necesariamente que se pueda predecir su futuro. Por una parte, el caos nos previene contra la tentación de suponer que ser capaces de modelizar un sistema utilizando ecuaciones matemáticas significa que entendemos todo lo que ese sistema pudiera hacer. Por otra parte, el caos también despertó una nueva esperanza:

⁶De fet, en el fons els problemes de física i química també són complexos, però les aproximacions a través d'equacions diferencials proporcionen models que, malgrat ser simples, són més eficaços que no pas ho serien els seus equivalents en Ciències Socials.

la de que comportamientos anteriormente desestimados por su carácter aleatorio y desestructurado pudieran, de hecho, tener pautas ocultas.

Aquesta última reflexió apunta inequívocament a l'estudi de la societat humana, doncs aquest sistema entra de ple en els entorns suposadament aleatoris i inestables que tracten, entre d'altres disciplines, la matemàtica del caos.

3.3.1 Aplicació en el camp de la Didàctica

La modelització d'un fenomen complex pot ser d'una gran ajuda com a eina didàctica si definim un model com a una eina abstracta dissenyada per a permetre entendre un fragment de la nostra realitat, i que ens permeti calcular la interacció amb la realitat a partir de la modificació dels paràmetres que el defineixen.

Per aquest motiu la modelització científica té un gran potencial com a eina didàctica; un model pensat per a mostrar de forma intuïtiva com funciona un determinat sistema (sigui físic, químic, històric, etc.) pot ser molt útil per tal d'explicar conceptes complexos a on intervinguin un número considerable de variables.

Un dels casos més clars és el model orbital d'electrons, que tot i haver-se superat per altres models molt més acurats (i complexos) segueixent emprant-se en l'ensenyament de la Química, donat el seu caràcter eminentment intuïtiu.

Així doncs, per tal d'estudiar un determinat problema poden conviure diversos models, que l'intentin tractar des de perspectives diferents i amb una complexitat diversa. Per aquest motiu, a través dels models amb els que analitzem un problema podrem fer-lo comprensiu.

A més, com hem explicat anteriorment, la formulació i comprovació d'hipòtesis, derivades dels models creats, són capaces de generar nou coneixement en els camps dels quals obté la seva informació. Per aquest motiu l'ús de tècniques d'aquest tipus en la Didàctica de la Història pot permetre, a banda del seu ús potencial com a eina de comprensió, el plantejament de nous camins de recerca dins la pròpia investigació històrica. El seu objecte d'estudi es comú tot i que siguin abordats des de perspectives diferents, i per aquest motiu poden crear models d'estudi amb

visions diverses del mateix tema. Cadascun dels models ha d'estar adequat a les necessitats de cada disciplina, i per aquest mateix motiu són complementaris i de cap manera excloents.

3.4 La simulació com a eina de recerca

La construcció d'un model és un punt de partida adient per a analitzar el món que ens envolta, però l'aproximació segons la qual podem resoldre el model matemàtic a partir d'equacions matemàtiques és difícilment assumible en alguns entorns, com per exemple el que ens ocupa. S'entra, així, en una contradicció, segons la qual si fem el model suficientment simple el podrem resoldre, però no ens serà útil per a entendre la realitat; de manera inversa, si el fem prou complex difícilment podrem resoldre'l.

Les ciències de la computació conformen una àmplia disciplina de recerca que implica múltiples camps de treball; des de la seguretat a les comunicacions, l'arquitectura dels ordinadors o el processament de senyal. Un dels aspectes més destacats d'aquesta ciència, que d'altra banda té una sòlida fonamentació teòrica, és que la seva recerca és eminentment pràctica. Així, existeixen diversos mètodes emprats per les ciències de la computació a mode experimental, d'entre els quals destaca la simulació.

Podem entendre una simulació com un intent de trobar una resposta a la pregunta “*què passaria si...?*”, amb la finalitat principal de saber com reaccionar davant d'una situació incerta, tot ajustant a la nostra voluntat una sèrie de paràmetres inherents al sistema. En concret, la simulació és (Shannon 1976):

...the process of designing a computerized model of a system (or process) and conducting experiments with this model for the purpose either of understanding the behavior of the system and/or evaluating various strategies for the operation of the system.

El que reflecteix aquesta definició és la opinió d'alguns autors que veuen la simulació com a un tipus especial de model matemàtic, dissenyat amb una intenció

clarament pràctica (Aris 1978, p. 3). El procés que una simulació comporta, doncs, inclou tant la construcció del model com el seu ús en tasques analítiques amb la intenció d'estudiar el problema que s'està intentant resoldre.

Segons d'altres, però, és una eina al servei de la modelització, en un procés metodològic que segueix tres elements (Jorba Monte i Josep Masdemont Soler 1995, p. 7):

1. Modelització matemàtica teòrica
2. Càlcul numèric per a resoldre el model en casos concrets
3. Execució de simulacions en un entorn computacional.

Si guina sigui l'aproximació teòrica al concepte de la simulació, el fet és que és una eina extremadament poderosa per a fer servir en un model matemàtic, ja que permet obtenir solucions per a problemes concrets i, d'altra banda, genera coneixement que pot repercutir en una reformulació del model inicial. Això equival a dir que la simulació, com a mètode de resolució de models, ens permet formular noves hipòtesis de treball de manera retroalimentària, tot refinant cada cop més el nostre model fins que s'adapti correctament al problema concret que estem estudiant.

Dins aquest procés, doncs, és essencial que la simulació s'adeqüi al prototipus que està intentant modelar i, per tant, el seu potencial dependrà tant de la fidelitat del model al prototipus com de la tria d'un conjunt de paràmetres d'entrada suficientment acurada (Brynielsson 2006, p. 19):

the simulation answers questions regarding what will happen in the model given that the assumed values turn out to be true.

Donat que la simulació és una eina aplicada en multitud de disciplines científiques, és difícil establir una metodologia comuna i emprada per totes elles a la vegada. Malgrat tot, és possible generar un mètode bàsic i genèric de treball, que funcioni en el cas que estiguem modelant sistemes reals, és a dir, que existeixin o hagin existit en un passat (Shannon 1976):

1. Definició del sistema. Això inclou determinar els límits de la matèria a estudiar, tot determinant les restriccions i regles que farem servir durant el procés de simulació.
2. Formulació del model. Conceptualització de les entitats del prototipus i les seves relacions, tot dissenyant el model de simulació⁷.
3. Preparació de les dades. Identificació i tractament de les dades necessàries per a alimentar el model de cara als experiments que es volen realitzar.
4. Traducció del model a un llenguatge acceptable per a la computació informàtica.
5. Validació. Aquest pas és vital, ja que comprova que les inferències extretes del prototipus al dissenyar el model són correctes i, per tant, és possible extreure conclusions dels resultats aportats per la simulació.
6. Planificació estratègica. Disseny de l'experiment a realitzar, tenint en compte les hipòtesis que volem comprovar o els fets que volem analitzar.
7. Planificació tàctica. Determinació de com s'implementaran els experiments a l'ordinador a partir d'una sèrie de tests.
8. Experimentació. Execució de la simulació, que generarà a banda dels resultats que pretenem estudiar tot un conjunt de dades relacionades amb el propi procés.
9. Interpretació. Extracció d'inferències a partir dels resultats de la simulació.
10. Implementació. S'apliquen els resultats extrets de la simulació al prototipus, tot formulant noves hipòtesis al voltant de les conclusions que es puguin extreure.
11. Documentació. Es genera coneixement a partir del procés, tant a nivell d'execució com dels seus resultats.

⁷Sovint aquest pas es realitza a través de diagrames lògics de flux o de blocs.

Aquesta metodologia de treball és resumida en la figura 3.1.

Com podem veure, la metodologia científica relacionada amb la simulació té una estreta relació amb la modelització matemàtica. De fet, els primers passos són exactament iguals, doncs per a simular alguna cosa és necessari abans un procés intensiu de construcció matemàtica; hem de delimitar el problema a estudiar, tot analitzant les diferents entitats que juguin un paper important en ell, així com les relacions que es puguin establir entre variables. Per a realitzar aquesta fase abans hem de definir el problema i establir com ho volem resoldre⁸, doncs en cas contrari el número d'entitats i relacions serà tan gran que la simulació difícilment funcionarà.

Aquesta discussió ens porta a una reflexió; si per una banda necessitem models simples per a fer-los fàcilment comprensibles (especialment si els estem aplicant a la Didàctica), i computacionalment eficients, per l'altra pretenem fer que la simulació s'executi de manera tant realista com sigui possible. Així, un dels punts essencials de la recerca a partir de simulacions és el fet que hem de trobar un equilibri entre complexitat i simplicitat, que sovint sols s'aconsegueix a partir de diverses iteracions per tot el procés. Dins aquesta problemàtica metodològica és especialment important la tria de variables, ja que en la majoria dels casos s'introdueix complexitat afegida dins una simulació sense necessitat, tal i com estableix el principi de Pareto, també conegut com a regla 80-20:

El 20% de les causes d'un fet produeixen el 80% de conseqüències, mentre que el 80% de causes restants tan sols genera el 20% restant d'efectes.

La solució és limitar-se a intentar trobar la resposta al problema plantejat, més que no pas en imitar el prototipus amb el màxim de complexitat possible.

Pel que fa a la validació del model, és una de les fases més complicades de tot el procés. Els simuladors semblen reals, en el sentit en el que tot té sentit dins l'entorn implementat i, per tant, a vegades es passen per alt les simplificacions i els supòsits que s'han fet per a dur-lo a bon port. Addicionalment no hi ha una manera directa de validar una simulació; l'investigador, per contra, ha d'executar

⁸Sovint a partir de la formulació d'hipòtesis de treball.

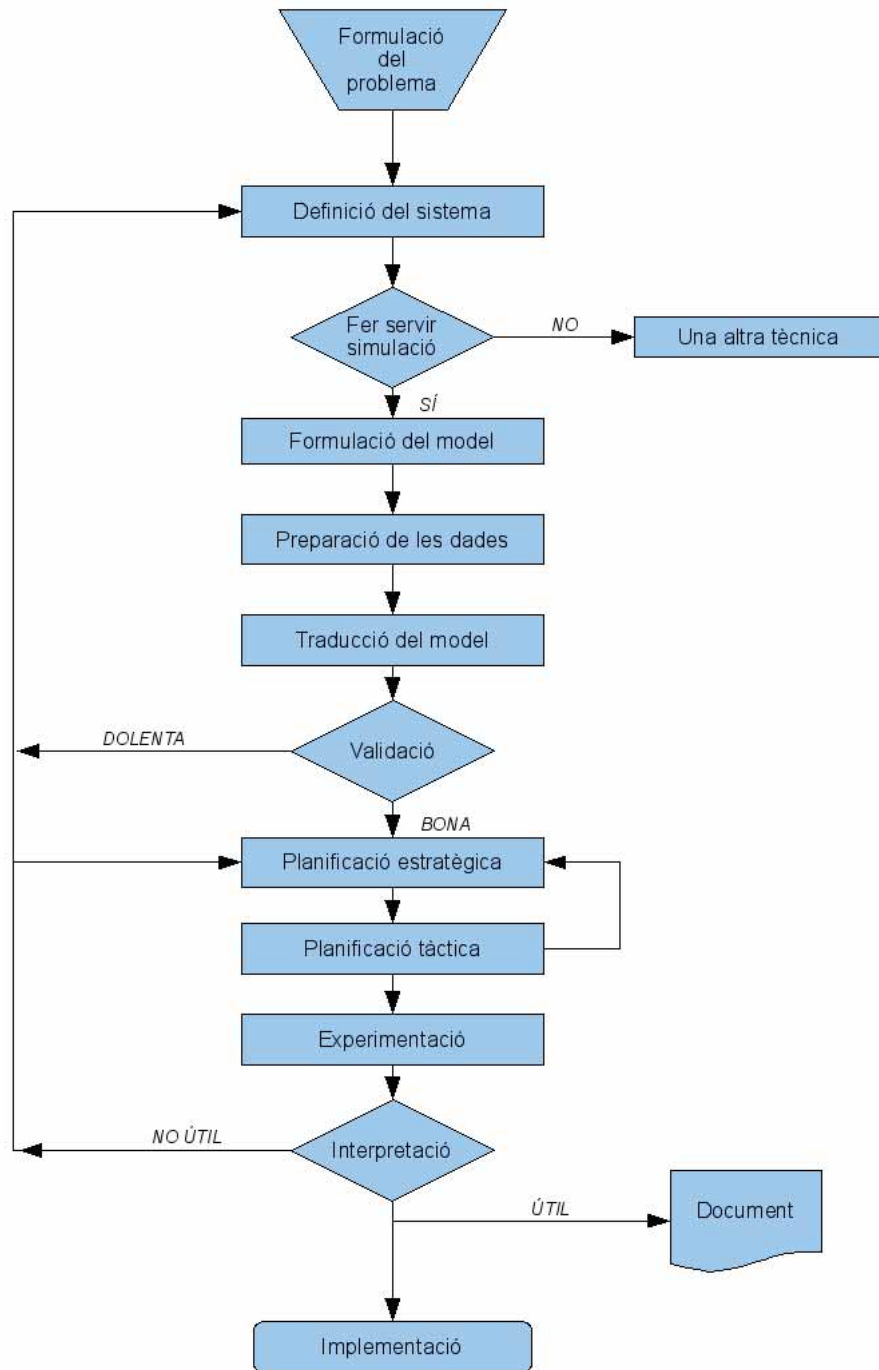


Figura 3.1: Procés de simulació

una sèrie de comprovacions per a veure si el seu model implementat es correspon amb el prototipus. Entre aquestes comprovacions podem destacar els tests d'estrés (que ens diran si el simulador funciona per valors d'entrada extrems), les proves amb conjunts de dades coneguts (per valors d'entrada donats coneixem les sortides que hauria de donar), etc.

Si la simulació és suficientment completa ens donarà uns resultats correctes pel model que estem utilitzant; si aquest sistema és una recreació correcta de la realitat que pretén modelar, aleshores la simulació serà vàlida per a predir els efectes que produirà al món real la situació plantejada en la simulació.

Així, la simulació és una de les eines d'anàlisi més potents de les que disposa un investigador que està intentant entendre un sistema complex (Shannon 1976).

D'altra banda, s'acostuma a veure la simulació com a una tècnica basada en la força bruta, ja que enlloc d'aconseguir la resposta a través d'una deducció matemàtica realitza aquesta mateixa tasca a partir del càlcul computacional; malgrat tot, l'èxit demostra la seva validesa.

3.4.1 Utilitat de la simulació

La utilitat dels simuladors per a resoldre problemes es basa en tres avantatges:

- **Tractabilitat.** La simulació d'un model matemàtic pot ser útil si ens trobem en el cas que sigui massa costós fer servir el sistema real. Cal destacar que aquesta avantatge és molt rellevant en quant a Ciències Socials es refereix, doncs evidentment no podem comprovar hipòtesis en aquests camps tot fent experiments amb la societat humana, doncs és un concepte naturalment inabastable per a l'investigador. En quant a societats passades es refereix, la tractabilitat encara és més important, donat que el problema que estem tractant ja no existeix i, per tant, qualsevol experiment seria impossible.
- **Entrenament.** Un simulador també pot servir per a entrenar a una persona per a realitzar una tasca determinada en un entorn controlat abans de que actui en el món real (per exemple els pilots d'avions).

- La caixa negra. En el cas que el sistema que estem estudiant no sigui gaire entès, o els seus resultats siguin prou impredecibles a causa d'un elevat grau d'incertesa, la simulació és una eina útil per a intentar entendre'l. Això fa que s'apliqui a la biologia o a la meteorologia, i més concretament, que la simulació sigui una eina a tenir en compte per a les ciències socials en general.

Cal destacar que un benefici paral·lel és el fet que, a causa d'estar forçat a entendre bé un model per tal de simular-lo, de manera gairebé involuntària s'està comprènent millor el prototipus real, ja que necessàriament s'exploren els mecanismes que regeixen el comportament del sistema estudiat.

Donades aquestes característiques, podem definir aproximadament el tipus de situacions en les quals seria convenient dissenyar simulacions per a formular i/o comprovar hipòtesis:

- Problemes en els quals no existeix cap formulació matemàtica, o ara bé el model matemàtic dissenyat no es pot solucionar amb les tècniques analítiques tradicionals.
- Situacions en les quals és possible resoldre el model matemàtic, però per a fer-ho l'haurem de simplificar tant que els resultats no seran rellevants en quant al prototipus es refereix.
- Models matemàtics pels quals la resolució és tan complexa que és més eficaç dissenyar una simulació.
- Problemàtiques en les quals el factor temporal és important. En determinades casuístiques és gairebé tant important l'evolució del model com el resultat final; en aquests casos, una solució analítica pura s'ha de desestimar perquè sols aporta el resultat final i, per tant, la simulació és la eina més interessant.
- Seguint la línia anterior, hi ha situacions a on el factor temporal hauria de modificar-se, donat que l'experiment real triga massa temps o massa poc per a ser fàcilment estudiat. La simulació ens proporciona un entorn en el qual és senzill parametritzar el temps a voluntat de l'investigador.

- La simulació és la única via d'estudi donades les dificultats en realitzar experiments en l'entorn del prototipus.

D'altra banda, alguns autors consideren que la simulació no comporta un procés d'optimització (Bratley, Fox, i Schrage 1987, p. 3). En aquest sentit intenta respondre qüestions com *El teu cost serà C si tries l'acció A*, i per tant no genera respostes com *El cost mínim és el que obtindràs si et decideixes per l'acció A*.

Malgrat tot cal considerar que en alguns problemes de Ciències Socials aquesta és precisament la forma que regirà les accions de cada actor dins el simulador. Exemplificant això dins el camp de la recerca història, imaginem que volem simular com es podrien comportar diversos comtats de la Marca Hispànica davant una ràtzia musulmana. És cert que el simulador intentarà obtenir la resposta més lògica i no la més òptima, però en tot cas els diversos elements que interactuen en aquesta situació (nobles, mercaders, soldats, etc.) voldran efectivament triar la seqüència d'accions que els sigui més propícia i, per tant, ells sí que triaran les seves accions seguint el cost mínim i el benefici màxim (en el cas dels comandants musulmans capturar les majors riqueses possibles, en el cas dels nobles protegir les seves possessions, etc.).

Així, com veurem en els casos d'estudis posteriors la simulació ens permet obtenir camins òptims de pas, donada una situació particular. Aquest camí no comportarà el major benefici per a qui el segueix, però paradoxalment estarem requerint del sistema que ens doni la solució més lògica per a un actor que estigui intentant obtenir el màxim benefici.

3.4.2 Simulació discreta i contínua

La simulació pot aplicar-se tant a models d'equacions diferencials com a models discrets. Mentre que en el primer cas s'han de discretitzar els problemes a resoldre (a través de tècniques com l'anomenat mètode dels elements finits), en el segon cal detallar com es comportaran, dins la nostra simulació, cadascun dels elements que s'han definit.

Usualment els models matemàtics continus es transformen, computacionalment parlant, en simulacions a on el temps està definit de manera constant, i dividit en

una sèrie d'interval·ls amb igual valor. Per contra, les simulacions d'entorns discrets pretenen analitzar cadascun dels components del sistema i, en conseqüència, les fases de l'execució estan més orientades als diferents esdeveniments fets per aquests components. És a dir, enlloc de dividir el temps en interval·ls concrets i constants, la divisió es fa a partir del factor temporal en el qual cadascun dels esdeveniments està actiu (Shannon 1976).

Malgrat tot, cal destacar que aquesta divisió no és incompatible. Existeixen alguns casos en els quals és tant important el factor temporal com els components individuals. En aquests problemes, d'entre els quals ens interessin especialment els que fan referència a fets històrics, hauran de tenir en compte els dos modes d'execució.

Normalment, però no sempre, la simulació discreta es basa en l'ús de variables aleatòries, que es fan servir com a entrades del sistema tot observant la resposta que aquest dona; si aquesta es correspon al que hem previst el resultat és que el simulador funciona. Aquest sistema, que rep el nom de mètode de Monte Carlo, pot ser particularment útil per a resoldre models difusos o diferencials en els quals la resolució a partir d'elements continus és difícil (Ríos 1995, pp. 187-204).

3.5 Simulació i Ciències Socials

Les simulacions proporcionen potents eines per a analitzar comportament i explorar escenaris possibles, permetent d'aquesta manera comprovar teories científiques, al mateix temps que en generen de noves de manera retroalimentària (Grossklags 2007). El camp de la didàctica de les Ciències Socials no és en aquest sentit diferent.

Si donem una ullada als problemes que hem d'afrontar dins el camp de la Didàctica, les Ciències Socials i les Humanitats, veurem que reflecteixen totes les necessitats típiques de problemes a on la simulació és l'eina adequada.

En molts àmbits de recerca relacionats amb la Didàctica trobem sistemes complexos pels quals difícilment serem capaços de formular un model matemàtic adient. Estem tractant amb éssers humans dins de problemàtiques relacionades amb l'apre-

mentatge i la cultura, factors tan poc explorats que, sigui per la complexitat d'aquest model o bé per la dificultat de resoldre'l analíticament, ara per ara no som capaços de modelitzar-los matemàticament⁹.

En aquest sentit, quan es realitzen models matemàtics en Ciències Socials en la majoria dels casos s'està estudiant una àrea ben delimitada, ja que en cas contrari podrem resoldre el model, però a costa de perdre la infinitat de matisos i variables que li donarien rellevància en quant a la plasmació dels resultats al prototipus¹⁰.

D'altra banda, una de les diferències més grans entre Ciències Socials i Ciències Físiques és que mentre en les últimes és possible fer experiments controlats per a validar hipòtesis, això no és usual en les primeres (Stewart 2007, p. 72). Així, no existeix un equivalent clar d'experiments relacionats amb la mesura de canvis en temperatura, efectes de la gravetat, o combinacions d'elements químics. A més, aquestes comprovacions no es poden repetir. Si ens centrem en la didàctica del patrimoni, podríem arribar a provar una hipòtesis de treball sobre la millor manera d'explicar un jaciment arqueològic, però difícilment podrem fer diverses proves amb museografia diferenciada, perquè el jaciment no canviarà diversos cops els mòduls despleats. Així, si sols apliquem la museografia derivada de la nostra hipòtesis, com podem saber que aquesta és més eficaç que no pas d'altres?

Una possible resposta és l'ús de simulació, ja que ens permetria provar l'efecte de diverses idees en un mateix entorn controlat i, per tant, les conclusions extretes serien més consistents¹¹.

⁹Per a explorar aquest camí de recerca s'haurien d'aplicar tècniques avançades com ara matemàtica del caos, teoria de jocs i sistemes dinàmics; aquests models, d'altra banda, són generalment complicats de resoldre.

¹⁰Probablement l'Economia sigui diferent en aquest aspecte, ja que fa molt més temps que en ella s'hi apliquen models matemàtics i, per tant, la modelització està més arrelada i desenvolupada. Addicionalment les ciències econòmiques s'ocupen de problemàtiques que, a priori, semblen més fàcils de modelitzar que no pas situacions relacionades amb la cultura i l'aprenentatge, donada l'existència de més variables quantitatives objectives en els problemes econòmics.

¹¹Evidentment, aquí també entra en joc un factor diferent, que és la validesa del model dissenyat enfront el prototipus.

3.5.1 Aplicacions en el camp de la Didàctica

Si ens centrem en interpretació i didàctica de la Història, pren una especial rellevància el factor temporal, així com la impossibilitat de fer experiments amb el prototipus. Els fets històrics han deixat d'existir i no podem accedir directament a ells; per tant, quan ho fem és a través del patrimoni que s'ha generat al respecte (sigui aquest oral, escrit, arqueològic, etc.). En quant al temps, sovint ens trobem amb problemàtiques a on coneixem aproximadament l'estat inicial i el final, però el nostre domini de l'evolució dels esdeveniments és dubtosa.

En aquest context, és molt més interessant conèixer els passos intermedis en la resolució d'un problema que no pas el resultat final, que d'altra banda probablement ja coneixem. Així, l'aplicació de la simulació pot ser molt interessant en quant a problemes de Ciències Socials es refereix, i en concret en l'entorn de la Didàctica de la Història. Si expliquem els diferents esdeveniments històrics com a fets consumats que hem d'assimilar estarem fent un dèbil esforç en quant a la transferència de coneixement es refereix. Cal explicar tot el procés tot esbrinant i mostrant les causes que van modelar el passat de manera sistemàtica i sense caure en l'error de donar una errònia sensació d'inevitabilitat, com si les coses haguessin de succeir per força com ho van fer.

A més, un altre fet que contribueix a esvaïr aquest idea de coneixement diví i inaccessible és mostrar la metodologia científica que ens ha permès saber el que estem explicant als visitants d'un museu, als alumnes d'una escola, etc. En aquest sentit, la simulació és una eina poderosa doncs permet, al mateix temps que es fan experiments d'investigació, generar tot un coneixement apte per a la didàctica, ja que el seu resultat usualment és transferible a elements d'intermediació didàctica en forma d'audiovisuals, cartografia comprensiva, etc.

La simulació, doncs, ens fa capaços d'explicar sistemes tan increïblement complexos com els que engloben el conjunt de la societat humana. En aquest sentit, a la frase d'Albert Einstein (Barceló 1996, p. 149):

La tarea de la ciencia no es explicar a qué sabe la sopa, sino explicar

cómo ha llegado a tener el sabor que tiene.

podem afegir que addicionalment la ciència té el deure d'explicar, a través de la didàctica, el procés pel qual pot ésser capaç d'explicar el sabor de la sopa. Tant en un sentit com en l'altre, la simulació és una de les eines més importants al seu abast.

A banda de la capacitat per validar hipòtesis fetes sobre l'objecte d'estudi, una simulació científica té una altra utilitat. Si hem definit les regles segons les quals es comporta la matèria a analitzar, i també som capaços d'interactuar amb el model mitjançant l'experimentació, podem modificar, per tant, les variables d'entrada del model, veure quina reacció provoquen dins el món virtual definit per ell, i observar-ne els resultats, és a dir, les conseqüències de les nostres accions. És evident que els resultats seran orientatius, tenint en compte que qualsevol model no és real sinó una versió simplificada de la realitat, però poden arribar a ser altament realistes si la complexitat que hem aconseguit englobar dins d'ell és suficientment important.

Dins el seu ús com a eina didàctica, però, els resultats obtinguts no són tan importants com el procés d'experimentació desenvolupat, així com les deduccions que puguem obtenir de la manipulació dels paràmetres dels models.

Així doncs, no fa falta un model excessivament complex per tal d'obtenir resultats satisfactoris de l'ús de la simulació dins la Didàctica, i de fet això podria ser contraproduent en la mesura que un model amb un número considerable de paràmetres podria ser més confús, especialment si és una hipòtesi i no està comprovada la seva efectivitat.

La simulació, doncs, ajuda a entendre la importància dels diferents paràmetres que juguen un paper important dins el cas d'estudi (així com els que no són rellevants, fet prou important). A partir dels paràmetres doncs, podem descobrir les seves relacions, així com la seva influència recíproca. Finalment, al tenir la capacitat de modificar aspectes del model, el simulador ha de reflexionar sobre la presa de decisions i les relacions de causa-efecte presents al petit univers que representa el sistema amb el qual està interactuant.

Tot i que no és l'objectiu d'aquest treball, cal destacar d'altra banda que aquest potencial no ha passat desapercebut tampoc en l'àmbit de l'educació escolar reglada.

Així, existeixen nombrosos exemples relacionats amb l'ensenyament de la biologia, la física o la química a partir de classes assistides per ordinador (O'Shea i Self 1985, p. 109):

...es un ejemplo de una de las técnicas más difundidas en la enseñanza asistida por ordenador: la de la simulación.

Malgrat tot, cal destacar la inexistència, dins d'aquesta publicació dedicada al món de la IA aplicada a l'ensenyament de la secundària, d'exemples relacionats amb les Ciències Socials.

3.6 Simulació i Intel·ligència Artificial

Com ja hem comentat anteriorment els models usuals basats en equacions diferencials no ens són útils quan intentem resoldre problemes relacionats amb entorns complexos, a on cada actor fa un paper diferenciat. En aquest context, podem fer servir la simulació com a eina d'aproximació als resultats vàlids d'un problema donat.

Seguint aquesta línia, i donat que en parlar de Ciències Socials ens estem referint directament a tot allò relacionat amb la societat humana i, per tant, amb el mode de pensament de l'ésser humà, la recerca duta a terme en el camp de la Intel·ligència Artificial pot proporcionar als investigadors noves maneres d'experimentar i formular hipòtesis en un entorn tan complex com és aquest (Kohler 2000, p. 1):

More than some dry computer science technology or another corporate software gambit, this technology is in fact provoking great interest in the possibilities of simulating social, spatial, and evolutionary dynamic in human and primate societies in ways that have not previously been possible.

Per aquest motiu en aquest apartat tractarem els conceptes bàsics de la Intel·ligència Artificial, quin tipus de problemes intenta analitzar i com els resol. Tot

seguit s'exploren les possibilitats que aquestes tècniques poden tenir dins el camp de la Didàctica de les Ciències Socials.

3.6.1 Definició d'Intel·ligència artificial

No és gens fàcil definir una disciplina científica tan multidisciplinar i complexa com és la Intel·ligència Artificial. De fet, malgrat la seva relativa joventut (poc més de 50 anys) el concepte ha anat variant al llarg del temps, i fins i tot els experts en el tema tenen idees diferents sobre el que és i el que hauria de ser.

Per aquest motiu podem trobar dues grans branques de la disciplina, que comporten dues definicions diferents. Mentre que la primera afirma que la Intel·ligència Artificial és l'intent de crear sistemes que pensin i actuïn com a éssers humans, la segona centra els seus esforços a dissenyar sistemes que pensin i actuïn de manera racional (Russell i Norvig 2004, pp. 2-3). Aquesta diferenciació té la seva arrel en la diferència entre pensament humà i pensament racional.

3.6.2 Agent racional

En termes d'Intel·ligència Artificial, un agent és qualsevol cosa capaç de percebre el seu entorn a través de sensors i que pot reaccionar a una situació donada en aquest entorn a través d'actuadors (Russell i Norvig 2004, p. 37). Cal dir que aquesta definició no es limita tan sols a robots, tal i com es podria pensar en un primer moment.

Per la Intel·ligència Artificial un ésser humà també és un agent, que fa servir els sentits com a sensors, i braços, cames, boca, etc. com a actuadors. De fet, un agent ni tan sols ha de ser un element físic, doncs també pot ser un element dins d'un programa¹², altrament anomenat agent software o softbot.

Un agent, doncs, anirà prenent decisions tenint en compte quines percepcions ha tingut fins aquell moment dins de l'entorn a on existeix, a més de les ordres que se li hagin donat.

¹²Podem trobar agents en qualsevol aplicació que fem servir, des de els personatges d'un videojoc fins un programa que recomani música basant-se en els gustos de l'usuari.

D'altra banda, un agent racional és aquell que fa allò correcte; és a dir, pren les decisions que, segons la seva programació, donen un resultat millor. Aquesta definició ha de tenir en compte, doncs, el principi de racionalitat, segons el qual (Newell 1982):

If an agent has knowledge that one of its actions will lead to one of its goals, then the agent will select that action.

Per aquest motiu cal algun tipus de mesura del seu rendiment, que ens serveixi per a saber quan un agent està fent les coses bé; en una paraula, necessitem algun mecanisme que indiqui quan un agent està essent racional¹³.

Per a ser útils, aquestes mesures de rendiment han d'ésser objectives per força, doncs en cas contrari no ens serviran per a parametritzar el comportament de l'agent. Per aquest motiu, la tria de les mesures de rendiment serà tan important com els altres factors que trobem al definir un agent (entorn, sensors i actuadors). Tots junts formen el que s'anomena entorn de treball, sota l'acrònim **REAS** (Rendiment, Entorn, Actuadors, Sensors).

Així doncs, per a dissenyar un agent que ens ajudi a realitzar una tasca (en el cas que ens ocupa, simular un problema per tal de generar noves hipòtesis) el primer pas serà especificar aquest entorn de treball.

3.6.3 Característiques d'un entorn de treball

Els entorns de treball poden ser molt diversos, però els podem classificar per una sèrie de propietats:

- Totalment observable o parcialment observable. Si un entorn és totalment observable l'agent pot, a través dels seus sensors, conèixer tot el que li és necessari per a realitzar les seves tasques. Si és parcialment observable desconeix alguns paràmetres, i per tant necessita mantenir algun tipus de memòria sobre el que ha conegut abans, així com mecanismes per a obtenir noves observacions.

¹³És destacable la similitud entre aquests conceptes i els de la teoria de jocs, especialment pel que fa a la funció d'utilitat i les mesures de rendiment, com veurem més endavant.

- **Determinista o estocàstic.** En un entorn determinista qualsevol estat temporal es pot deduir de l'estat anterior i de les accions preses per l'agent. Per contra, en un estat estocàstic alguns esdeveniments passen de forma aleatòria, tot obeint algun tipus de probabilitat.
- **Episòdic o seqüencial.** En un entorn episòdic cada acció de l'agent no té conseqüències més enllà de la pròpia acció. En un entorn seqüencial les accions de l'agent poden tenir conseqüències a llarg termini.
- **Estàtic o dinàmic.** Un entorn estàtic no canvia mentre l'agent no realitza cap acció, mentre que en un entorn dinàmic sí que ho pot fer.
- **Discret o continu.** Els problemes amb entorns discrets tenen un número finit d'estats, mentre que en un entorn continu trobem infinits estats intermedis entre cadascun dels propis estats.
- **Agent individual o multiagent.** Un entorn té un agent individual quan sols ell és qui pot prendre decisions. En un entorn multiagent tenim diversos agents convivint al mateix temps, prenent decisions i actuant. Aquesta apreciació és molt important, doncs en entorns multiagent cadascun dels agents hauria de tenir en compte als altres.

Cada entorn de treball que puguem imaginar es pot definir amb aquestes sis característiques. Així, per exemple el joc d'escacs és un entorn totalment observable, determinista, seqüencial, estàtic, discret i multiagent. Un exemple oposat seria un soldat del segle XVIII dins un combat, que seria un entorn parcialment observable, estocàstic, seqüencial, dinàmic, continu i multiagent.

3.6.4 Tipus d'agents

Existeixen quatre tipus bàsics d'agents, classificats segons el mètode amb el qual prenen les seves decisions. Els agents també es poden classificar segons tipus de sensors i actuadors, però aquests són innumerables i, per tant, el mètode de decisió sembla el factor òptim per a classificar els agents.

- Agents reactius simples. És el tipus més senzill d'agent, que funciona elegint una acció a partir de les percepcions actuals de l'entorn (és a dir, sense cap mena de memòria dels estats temporals anteriors). En general aquests mecanismes funcionen en base a una sèrie de regles lògiques booleanes de l'estil *Si PERCEPCIÓ A aleshores EXECUTAR ACCIÓ B*. Això fa que la seva implementació sigui relativament simple, però per contra no tingui gaire intel·ligència; la falta de memòria sobre estats passats implica que, per tal que funcioni correctament, l'entorn de treball hagi de ser totalment observable. A més no podrà reaccionar a situacions imprevistes, i la seva aplicació en entorns complexos implicarà la creació d'un número ingent de clàusules condicionals com la descrita.
- Agents reactius basats en models. Per tal de desenvolupar agents que tinguin una capacitat de decisió més elaborada fa falta la construcció d'un model del seu entorn. Així, el segon tipus d'agent possible és el que reacciona basant-se, a més de les seves regles, tenint en compte l'entorn en el que desenvolupa la seva acció. D'altra banda, el model d'aquest entorn es pot implementar de moltes formes diferents (lògica booleana, teories científiques, probabilística, etc.).
- Agents basats en objectius. La següent etapa en quant a complexitat és la introducció d'objectius en el disseny de l'agent. En aquest cas ja no estarem parlant d'un agent reactiu, doncs aquest actuarà tenint en compte els objectius marcats, i no pas solament el que passi al seu voltant. Aquests objectius poden ser a curt termini, o bé a llarg termini, per la qual cosa farà falta algun tipus d'algoritme o planificador que permeti assolir l'objectiu final a través d'una seqüència d'accions més o menys complexa.
- Agents basats en utilitat. Els agents anteriorment descrits no són capaços de valorar entre diverses alternatives que menin a un mateix objectiu. És a dir, tan sols poden saber si una determinada cadena d'accions farà que tingui èxit en la seva empresa, però donades diverses estratègies alternatives són

incapaços de triar-ne una per sobre de les altres. Així, arribem a una nova tipologia d'agent, prou més complexa que les anteriors i que, d'alguna manera, està molt més propera a la manera segons la qual els éssers humans avaluem i prenem les nostres decisions. Tant és així que se'ls anomena *agents basats en utilitat*, que és de fet el mateix concepte del qual parlarem al modelitzar decisions racionals mitjançant teoria de jocs a l'apartat 6.4.3. Aquests agents disposen d'un mecanisme conegut com a **funció d'utilitat**, que serveix per a mesurar quina de les estratègies a l'abast de l'agent és la més adequada de totes les vàlides.

Addicionalment els agents més complexos poden tenir diversos objectius, essent alguns d'ells contradictoris entre sí. Imaginem-nos, per exemple, que estiguem intentant simular una campanya militar, a on programem un agent que decideixi la ruta d'un exèrcit des d'una fortalesa a una altra. Així, l'agent estarà dissenyat per a ser capaç de trobar la millor ruta d'un punt a l'altre a través de la geografia de la zona, i fer marxar les tropes el més ràpid possible. El destí seria, evidentment, l'objectiu principal, però en podem trobar d'altres de bàsics, com poden ser el fet de no endinsar-se en zona enemiga, mantenir els combatents alimentats, evitar que es cansin massa si s'accelera el pas i especialment conèixer l'àrea per on ha de passar per a evitar emboscades. La seguretat i la velocitat són dos objectius contradictoris, així que un agent que funcioni per utilitat haurà de tenir implementada una funció que li permeti trobar l'equilibri entre els diferents objectius que pugui tenir.

Finalment, la funció d'utilitat també ha de dotar a l'agent de capacitat de decisió en el cas d'estar en una situació d'incertesa. Així, si l'agent es troba en el cas de poder escollir estratègies diferents, sense conèixer exactament si cap d'elles la durà al seu objectiu final, haurà de poder establir, tot fent servir la funció d'utilitat, quina de les accions l'acostarà més als objectius marcats al seu disseny.

Cal destacar que aquesta classificació no té en compte la manera segons la qual un agent assoleix el coneixement necessari per a prendre decisions. És a dir, hem detallat com l'agent analitza una situació i pren una decisió racional en conseqüència, però no el mètode segons el qual s'inicia el comportament d'aquest agent. Hi ha dues maneres bàsiques de fer-ho, de forma manual o automàtica.

La forma manual consisteix en programar l'agent en la seva totalitat, tenint en compte el conjunt de situacions en les quals es pot veure involucrat i decidint com avaluarà i prendrà les decisions. Per als casos més senzills, a on l'escenari està definit i conegut en la seva totalitat, és possible prendre aquesta mesura, però és evident que difícilment podrem contemplar tota la casuística a la que es pugui enfrontar un agent en un sistema suficientment ric i complex, com per exemple el món real. Per això hi ha tota una línia de recerca basada en agents que tenen mecanismes d'aprenentatge, que els permeten adquirir nous comportaments i modificar els existents tenint en compte la situació a la que es puguin enfrontar, així com la seva experiència anterior.

Aquests mecanismes d'aprenentatge, al seu torn, poden ser de dos tipus, depenent si és un ésser humà, o bé el propi agent, qui decideix si un nou comportament és adequat o no en una situació donada. Mentre que si ho fa un ésser humà el procés és més segur (conegut com a aprenentatge supervisat), l'altre, l'aprenentatge no supervisat, permet que l'agent avalui correctament cadascun dels casos.

En alguns casos, però, a on existeixin milers de combinacions i possibles resultats, l'aplicació de l'aprenentatge supervisat és més aviat impossible. Per exemple, en el cas d'un agent que es dissenyi per a jugar a escacs, aquest aprendrà molt més ràpidament si pot anar jugant contra ell mateix o contra altres màquines, enlloc d'esperar a que un humà li digui quines jugades són correctes i quines no; simplement anirà provant combinacions de peces, tot anotant-se en cada cas si guanya o perd la partida. Així, en poc temps un agent que aprengui per mètodes no supervisats aprendrà quins moviments són els correctes i quins no, sense fer falta un humà que estigui controlant el que aprèn el sistema.

3.6.5 Tipologies d'Intel·ligència Artificial

La disciplina que estem tractant en aquest capítol ha generat una gran quantitat d'aplicacions de caire molt diferent. Des del reconeixement de formes i símbols en imatges fins a l'intent de simular el comportament humà¹⁴, la Intel·ligència Artificial explora la resolució de problemes de tot tipus, en una sèrie d'aproximacions diferents que podem intentar classificar de forma resumida segons la manera amb la qual l'agent protagonista del problema intenta trobar solucions adequades al mateix.

3.6.5.1 Cerca i exploració

Els problemes de cerca i exploració són aquells en els quals es tracta de trobar una seqüència d'accions que portin a l'agent a aconseguir el seu objectiu. Partint d'una situació inicial, aquest agent ha de cercar l'estratègia adequada d'entre totes les que estiguin al seu abast. Aquest tipus d'algorismes tracten amb entorns estàtics, doncs la formulació i cerca del problema no té en compte canvis en l'ambient en el qual està localitzat l'agent. Són també entorns observables i discrets, ja que l'agent coneix en tot moment en quin estat es troba, i té accions concretes al seu abast. Finalment són deterministes, doncs les accions són limitades, i els estats de l'agent també; no podrà reajustar-se si les condicions varien en qualsevol moment.

Per aquests motius és el tipus de sistema més senzill, com a mínim a nivell teòric. És emprat en multitud de casos, des del càlcul de rutes amb navegadors GPS (Mizoguchi i Hiraishi 2003) fins a la implementació d'ordinadors capaços de jugar a escacs (Mannen 2003).

3.6.5.2 Lògica

La següent família d'algorismes contemplada en la Intel·ligència Artificial és aquella que permet als agents raonar sobre l'entorn en el qual viuen, que pot ser de tipologia molt variada. Això implica un grau de complexitat prou elevat, doncs per a fer-ho l'agent necessitarà obtenir coneixement sobre l'entorn en el qual està, que serà

¹⁴Veure al respecte la prova coneguda com a Test de Turing, dissenyat pel famós matemàtic l'any 1950 (Russell i Norvig 2004, p. 3).

codificat en aquest cas en forma de sentències d'un llenguatge de representació del coneixement concret, que quedin emmagatzemades dins una base d'informació. La lògica és un sistema de llenguatges adequat per a permetre a un agent codificar el món de forma entenedora. Existeixen diversos tipus de llenguatges lògics, que permeten graus diferenciats de complexitat i riquesa en els codis creats amb ells (lògica proposicional, de primer ordre, descriptiva, etc.).

3.6.5.3 Planificació

Les famílies d'algorismes anteriorment esmentades formen part del que s'anomenen planificadors. Els problemes de planificació són aquells en els quals, per a un problema concret, s'intenta encadenar una seqüència d'accions que permetin a l'agent arribar a un estat en el qual se satisfacin els objectius donats. Existeixen, però, d'altres planificadors més complicats, que prenen decisions de manera més complexa que no pas els anteriors, i fins i tot poden abordar problemes en entorns no deterministes i parcialment observables (dins la disciplina coneguda com a planificació no-clàssica).

3.6.5.4 Raonament Probabilista

Quan un agent actua dins un entorn parcialment observable i estocàstic, en el qual no pot conèixer completament l'estat en el que es troba, així com les conseqüències completes de les seves accions, ens trobem amb un tipus de problema anomenat de raonament probabilista. En aquest, és necessari introduir variables amb un cert component d'aleatorietat, en el qual les coses poden passar amb un percentatge de certesa, enlloc de tenir l'axioma de Cert/Fals que es fa servir normalment en lògica. Això comporta canvis importants en la manera segons la qual l'agent aborda els seus problemes, doncs caldran mecanismes que l'ajudin a saber si està executant les accions correctes, dins un entorn que no acaba de conèixer. En aquest sentit hi ha múltiples mètodes de treball, com les xarxes bayesianes o les cadenes de Markov (Halpern 2003).

3.6.6 Selecció de tècniques

Entre aquestes tècniques en podem, doncs, seleccionar les que siguin més útils per a simular el tipus de problemes que ens trobem a les ciències socials, i més en concret en la interpretació de camps de batalla.

Les tècniques útils en aquesta recerca concreta es poden dividir en dos grans conjunts, tenint en compte si ens serveixen per a intentar solucionar problemes derivats del terreny o bé de l'anàlisi de decisions. Aquestes dues àrees són els punts mencionats a la introducció, en els quals la simulació ens pot proporcionar dades addicionals a les que ja tenim a partir de fonts textuals, tot intentant formular hipòtesis de treball. Cal destacar que, com veurem, el tractament d'aquests factors no és independent, i en tots dos és necessari integrar variables procedents del tercer punt bàsic en quant a l'estudi de la història de la guerra: les persones que formaren els exèrcits, així com el seu equipament. Aquesta interrelació és tan evident que les tècniques emprades seran molt similars, aplicant-se en general la família d'algorismes que serveixen per a resoldre problemes de cerca i exploració en entorns de grafs.

3.6.6.1 Intel·ligència Artificial i terreny

L'anàlisi del terreny és un dels sectors en els quals es poden aplicar més fàcilment els algorismes de cerca, donat que el territori forma un entorn que, des del punt de vista de l'investigador, és totalment observable i conté una sèrie de valors que permeten aplicar algorismes d'optimització a fi i efecte de detectar la millor forma de fer-lo servir.

Així, a partir de l'aplicació d'algorismes com els anomenats A^* , Dijkstra, etc. podem trobar les rutes òptimes per a travessar un fragment de territori donat; la IA també permet resoldre problemes relacionats amb el posicionament de recursos, donades les casuístiques particulars del paisatge. A l'apartat 5.3.8.5 veurem en més profunditat les particularitats d'aquest tipus d'aplicacions.

3.6.6.2 Intel·ligència Artificial i decisions

La IA proporciona un dels mètodes més eficaços de resolució pel que fa a problemes derivats de l'anàlisi de decisions, i conegut com a algorisme MiniMax. És un algorisme de cerca informada, en el qual podem intentar esbrinar el resultat que tindrien una sèrie d'accions dins un entorn competitiu, a on tenim dos agents que intenten obtenir el millor resultat possible per a ells, i que en cada fase del joc que estan realitzant saben aproximadament quin valor esperar de cada decisió.

Per algorisme de cerca informada entenem aquell que no fa servir la simple força bruta per a anar explorant el millor camí d'entre els possibles al seu abast, que en alguns casos poden arribar a una xifra molt elevada, com per exemple en el cas dels escacs. Així, la cerca informada fa servir diverses tècniques per a *tallar* aquesta quantitat d'opcions tant elevada, a partir de l'heurística, que és (Pearl 1985, p. 3):

Heuristics are criteria, methods, or principles for deciding which among several alternative courses of action promises to be the most effective in order to achieve some goal. They represent compromises between two requirements: the need to make such criteria simple and, at the same time, the desire to see them discriminate correctly between good and bad choices.

A l'apartat 6.7 descriurem en profunditat el teorema MiniMax, així com la seva aplicació dins el camp de la teoria matemàtica de jocs i el procés de presa de decisions.

3.6.6.3 Models basats en Agents

Més enllà dels problemes relacionats amb el terreny i la resolució de problemes amb dos jugadors, seria interessant fer servir eines que intentessin reproduir la conducta humana dins d'entorns amb múltiples agents. En aquest context cal un tipus especial de simulació que ens permeti integrar el complex món del procés de decisió de l'ésser humà en contacte amb altres persones, tot integrant-hi altres variables rellevants en el problema que estem tractant, com poden ser accidents geogràfics, recursos

naturals a l'abast, etc.

Diverses tècniques intenten abordar aquest problema, tant des del punt de vista de la simulació contínua com de la discreta (Barceló 1996, p. 124). D'aquests destaca el mètode de la modelització basada en agents¹⁵, que intenta detectar patrons de comportament generals sota la hipòtesi que aquests poden emergir a partir de la suma de decisions individuals fetes pels diferents actors d'un sistema social concret.

Així, a partir de la modelització del comportament individual d'un grup d'individus, i de la teoria relacionada amb Vida Artificial, el sistema ABM intenta interpretar un problema donat en el qual existeixin múltiples centres de decisió rellevants, que interactuen entre ells (a vegades en forma de cooperació, d'altres a partir de conflictes violents) a fi i efecte que cadascun d'ells aconseguixi, donades les circumstàncies, el millor resultat particular (Barceló 2008, pp. 311-323).

En aquest context, l'aplicació de sistemes basats en agents en la problemàtica dels enfrontaments a l'edat moderna pot ser interessant, doncs existeixen nombrosos estudis que intenten aplicar aquesta tipologia de models als conflictes bèl·lics actuals (Ilachinski 2004) i contemporanis (Doran 2006). El problema principal, d'altra banda, és que es requereix un coneixement molt profund del prototipus a modelar i, per tant, primer de tot cal analitzar el procés de presa de decisions d'aquests exèrcits, tal i com es proposa al llarg d'aquesta tesi.

3.7 Modelització d'un conflicte bèl·lic

Un cop definida la metodologia a seguir, així com les diferents tècniques al nostre abast per a validar els models proposats, cal seguidament examinar el prototipus a tractar, a fi i efecte d'esbrinar com el podem estudiar.

Es pretén, doncs, examinar la manera segons la qual es pot modelitzar un conflicte bèl·lic, de manera que s'obtingui un benefici a nivell investigatiu i didàctic. Per tal d'explorar aquest potencial en quant a la comprensió del territori i la Història, és necessari definir quins factors són fonamentals explicar en relació a aquests fets.

¹⁵Conegut com a ABM (Agent Based Modelling).

Com hem dit anteriorment, la capacitat d'un model per a relacionar variables provinents de fonts independents és un dels símptomes que permeten conèixer si aquest és vàlid. Per tant, si podem aïllar i analitzar cadascuna d'aquestes variables, tot unint-les en un marc de referència que les integri i ens permeti comprendre-les, estarem demostrant que realment és un model útil.

Les variables més importants que s'han de tenir en compte si pretenem estudiar un determinat enfrontament (sigui una operació, una batalla o bé una guerra a gran escala) es poden englobar, en línies generals, en tres grans blocs, tenint en compte tres preguntes principals: qui es va enfrontar, en quina zona i per què ho van fer. Solament responent a aquestes preguntes serà possible entendre com va passar el fet; és a dir, la manera en la qual es va desenvolupar una determinada acció. Per tant, englobarem aquests factors en tres grans àrees, definides de manera que el conjunt de variables que suposen són presents sempre en enfrontaments bèl·lics, de manera constant: els exèrcits, el territori, i l'estratègia¹⁶.

Un cop conceptualitzat el model l'hauréu de modelitzar. Tenint en compte que són factors prou diferents caldran tècniques diverses per a fer-ho. Mentre que el primer sembla el més fàcil, doncs està íntimament relacionat amb l'anàlisi de les fonts documentals tal i com es fa habitualment en investigacions relacionades amb la història de la guerra, el tercer requereix de models matemàtics coneguts com a teoria de jocs, en els quals s'analitzen les decisions de les persones humanes en entorns competitiu amb diversos protagonistes. El segon, al seu torn, serà estudiat a partir de la modelització geogràfica del camp de batalla, que permet comprendre el paper jugat pel terreny a partir de l'anomenat anàlisi espacial. Tots dos tipus de models estan emmarcats, dins la classificació feta en aquest capítol, en la tipologia de models finits (també dits discrets). Si la modelització geogràfica es basa en l'anàlisi de la representació discreta del terreny, la teoria de jocs fa servir un tipus de grafs anomenats arbres per a crear una representació de les decisions a l'abast

¹⁶ Aquí no fem servir el terme estratègia en la seva accepció relacionada amb moure grans exèrcits durant períodes prolongats de temps, sinó la que defineix l'estratègia com el conjunt d'accions elegit amb la finalitat d'aconseguir un objectiu.

dels protagonistes, tot triant el camí més òptim per als dos dins aquest graf, cosa que comportarà elegir la decisió més adequada per a cada jugador.

Cal dir que la modelització matemàtica és útil en la mesura en la que ens permet generar noves hipòtesis de treball; malgrat tot aquestes s'han de comprovar. Per a fer-ho, farem servir les dues eines que tradicionalment s'han emprat per a entendre el passat dels humans: la història, a partir de les fonts documentals, i l'arqueologia, a partir de les restes materials. Així, tot i que existeixen alguns models matemàtics dissenyats al voltant d'enfrontaments bèl·lics, molts cops aquests no són capaços d'integrar les fonts textuales, doncs parteixen d'una base purament analítica en la qual difícilment es podran trobar aplicacions útils en quant a Ciències Socials es refereix (Clements i Hughes 2004)

Seguidament farem un estudi detallat de cadascun dels tres factors esmentats. Aquest breu estudi, que conforma el final d'aquest capítol, serà continuat pels tres capítols següents, en els que s'analitza detalladament les tècniques usades per a interpretar-los i relacionar-los tot definint-los pel que fa als camps de batalla de l'edat moderna.

3.7.1 Els exèrcits en conflicte

El primer factor que analitzarem és l'experiència de la guerra al segle XVIII. Els combatents que participaren en un conflicte armat són, lògicament, un dels pilars sobre els quals s'assenta el seu desenvolupament i rellevància històrica¹⁷. Com s'ha especificat anteriorment, aquest element era menystingut fins fa no gaire dècades, ja que per sobre d'ell s'erigia com a factor únic i determinant el judici sobre l'actuació dels comandants, malgrat que aquests fets no fossin estudiats des d'un punt de vista analític, sinó factual.

Arrel de la publicació del llibre *The Face of Battle* (Keegan 1983) aquesta visió manipulada i simplista d'una batalla ha estat radicalment modificada, especialment

¹⁷No sols per la transcendència de la batalla sinó també pel fet que una part d'aquests soldats moriren al camp de batalla i, per tant, és un tema a tractar des d'un enfoc didàctic del conflicte.

en la última dècada¹⁸.

Al contrari que els treballs anteriors es van passar a considerar dins l'estudi d'una batalla factors tan essencials com els condicionaments culturals, psicològics i socials d'ambdós bàndols, tant a nivell de comandància com a escales més baixes de tropa). L'objectiu, en últim terme, és millorar la comprensió de la batalla analitzant-la des de múltiples punts de vista, amb la intenció d'entendre tant l'experiència de les persones que hi van participar com el desenvolupament pròpiament dit de la batalla.

D'altra banda, aquesta millora en la descripció d'una batalla pot implicar un major desafiament a la seva comprensió, doncs a l'eliminar la visió simplista anterior s'introdueixen noves variables a tenir en compte; les tropes que lluiten, doncs, deixen de ser blocs monolítics que ataquen o defenen com a robots que actuen com si pensessin de forma col·lectiva (avançant o retirant-se tots de cop, etc).

Així, existeixen una sèrie de factors determinants en la cultura i la societat de cadascun dels exèrcits que també han de ser considerats, a més del seu entrenament, tàctiques i, en definitiva, tot allò que influeix en la manera segons la qual els protagonistes d'un conflicte s'han enfrontat a un combat, siguin civils o militars¹⁹. Qualsevol model que intenti simular un conflicte bèl·lic (o altres tipus d'accions humanes) dins el corrent històric necessàriament haurà de tenir en compte el coneixement que tenim sobre la cultura i el pensament de l'època a estudiar, ja que no podrem entendre el comportament dels combatents sense donar rellevància als models culturals que intenten imitar, així com la suprema importància de la psicologia en les accions de cada soldat.

En aquest sentit és especialment interessant el punt de vista, fruit de l'experiència en combat, manifestat pel Coronel de l'exèrcit francès Ardant du Picq a finals del segle XIX (Picq 1921, p. 58):

I have heard philosophers reproached for studying too exclusively man

¹⁸Per a una descripció de la historiografia militar durant el segle XX veure (Espino 1993).

¹⁹Aquest tipus d'anàlisi, més proper a la història social del món militar que a la història militar pròpiament dita, té en el període antic els seus màxims exponents, com per exemple (Lendon 1999; Hanson 2000).

in general and neglecting the race, the country, the era, so that their studies of him offer little of real social or political value. The opposite criticism can be made of military men of all countries. They are always eager to expound traditional tactics and organization suitable to the particular character of their race, always the bravest of all races. They fail to consider as a factor in the problem, man confronted by danger. Facts are incredibly different from all theories. Perhaps in this time of military reorganization it would not be out of place to make a study of man in battle and of battle itself.

La crítica que fa és aplicable també a bona part de la historiografia militar redactada al segle XX i XXI. Així, podem trobar aquesta descripció de l'exèrcit britànic en el marc d'una publicació sobre la Revolució Americana (Mitchell 2004, p. 34):

Stunned, the British fell back, but with the characteristic courage of the British soldier, rallied and renewed the attack.

I en el mateix llibre, al parlar d'una marxa realitzada en ple hivern per soldats de l'exèrcit Continental americà (Mitchell 2004, p. 76):

The endurance and fortitude of the American soldier when resolutely and capably led has been demonstrated on many occasions throughout history but never more forcibly.

És aquest un bon exemple de les paraules de Du Picq; l'exèrcit americà, que s'havia constituït un any abans ja tenia, segons aquest llibre, unes característiques particulars diferents de les del britànic, trets que es poden trobar sistemàticament en obres dedicades als conflictes dels segles XIX i XX.

Així, amb el canvi de perspectiva proposat per la renovació metodològica els soldats passen a ser individus que responen de manera diversa a una situació de màxim estrès i perill, i com a tal és necessari entendre el seu comportament en un camp de batalla i, com a conseqüència, qualsevol interpretació fonamentada d'un

enfrontament bèl·lic també està obligada a explicar l'experiència dels éssers humans que hi participaren.

Per aquest motiu els factors culturals i socials establerts dins el nucli de cada exèrcit també han de ser considerats, així com el seu entrenament, tàctiques i, en definitiva, tot allò que afecti a la manera segons la qual s'enfronten al combat els que van ser protagonistes de l'acció, siguin soldats o civils. Això, per descomptat, també implica les persones que en van patir les conseqüències.

Tampoc s'ha d'oblidar l'aspecte tecnològic dels conflictes bèl·lics, doncs no serà fàcil entendre el desenvolupament d'un enfrontament sense examinar quin tipus d'equipament era emprat pels soldats, tot implicant no sols armes i màquines sinó també mitjans de comunicació, animals, i altres elements de suport al combat (Cipolla 1999).

Fins i tot en aquest anàlisi tècnic no s'ha de caure en el parany d'automatitzar la batalla. És evident que una millor capacitat tecnològica dota a un exèrcit d'un poder destructiu major, però més que no pas per aquesta mateixa capacitat, l'armament superior dona als soldats que el fan servir un efecte moral molt important i, al contrari, el coratge dels soldats enemics que vulguin posar-se a l'abast d'aquestes armes disminueix (Picq 1921, p. 58). És cert que un avenç tecnològic pot donar una victòria rotunda a un exèrcit en un moment determinat, però els models matemàtics mostren com, en un cas d'aquest tipus, l'avantatge és sempre temporal, doncs els exèrcits tendeixen a copiar allò que és efectiu del rival i, per tant, a igualar-se ²⁰.

Per tant, l'estudi de la tecnologia present a un camp de batalla ha d'anar sempre lligat a l'efecte que aquesta produeixi en els combatents, així com en tota la infraestructura que acompanya una força militar²¹.

Finalment, no s'ha de menysprear la importància que té, sobre tot esforç fet

²⁰Veure al respecte el model matemàtic conegut com a carrera d'armaments (Brams i Kilgour 1989, pp. 43-68).

²¹Aquest fet arriba al seu punt àlgid a mitjans del segle XX, quan la introducció d'armament atòmic va generar el clima d'equilibri crispant entre Estats Units i la Unió Soviètica conegut com a Guerra Freda. És prou suggestiva la idea que, sense aquest element de dissuasió tan devastador, realment hagués existit una Tercera Guerra Mundial.

per un exèrcit, la logística, entesa com a la tècnica que permet moure exèrcits i mantenir-los subministrats (Creveld 2004, p. 1). El sistema logístic emprat per una força militar és un factor que limita i estreny les capacitats del mateix, ja que bona part de les decisions fetes pels comandants aniran dirigides a assegurar els subministraments propis i amenaçar els de l'enemic; de la mateixa manera, sovint un exèrcit es veu obligat a descartar maniobres, plans d'atac i batalles per motius logístics, ja que si no disposa de l'adequada preparació (en forma de dipòsits i cadenes de subministres, un sistema àgil per a distribuir-ho fins l'avantguarda de les tropes, etc.) li serà impossible dur a terme les operacions més ambicioses.

Aquesta problemàtica és un dels camps d'estudi emergents en quant a l'ús de tècniques de modelització i simulació aplicades al camp de la història de la guerra, com bé demostra el fet que existeixen nombroses publicacions al respecte (Roth 1999; Haldon 2006). Per tal de dur a terme aquests anàlisis es poden aplicar tècniques relacionades amb la presa de decisions, anàlisi del terreny, Intel·ligència Artificial, etc. (Gaffney 2006).

Els elements a modelar dins aquests entorns són:

- Necessitats de la força militar.
- Subministres disponibles i esperats.
- Organització i Administració de la logística.
- Sistemes de transport.
- Artèries de comunicació.

Un cop definits aquests punts serà possible entendre com se subministra una agrupació de milers de combatents, tenint en compte que aquests mateixos conceptes són els que limitaran la forma en la qual aquests es comporten al llarg d'un conflicte.

3.7.2 L'estudi del territori

Un dels punts fonamentals per per a entendre el desenvolupament d'una batalla és el paisatge en el qual aquesta va tenir lloc. És una variable molt lligada a les

altres dues, doncs els objectius geoestratègics i la tipologia dels exèrcits són dos factors importants que expliquen el motiu pel qual una batalla va succeir en una zona determinada, tant a escala tàctica com operacional.

Aquesta variable vindrà condicionada de manera essencial per les armes i la manera de combatre de cada participant. Per una banda l'efectivitat de les armes a certes distàncies dictarà les dimensions d'un enfrontament determinat, doncs afecta l'anomenada "zona de matança"²² i, per tant, un camp de batalla de l'edat moderna serà molt diferent a un altre del segle XX, quan les distàncies de tir efectiu de les armes de munició es multiplicaren per 10 o 20.

Per altra banda el tipus de batalla, condicionat pel número d'individus dins cada exèrcit, els trets culturals i la personalitat dels comandants afectarà la presa de decisions relativa a l'elecció del territori a on combatre, així com la incidència que aquest pugui tenir en l'acció. Dins el pensament occidental, per exemple, l'anomenada batalla campal ha estat l'element predominant fins ben entrat el segle XIX (Weigley 2004), doncs les guerres a l'Europa Occidental han estat sempre dirigides cap a la batalla decisiva, tant sols derivant cap a conflictes del tipus guerriller si un dels bàndols era enormement superior a l'altre, com per exemple l'anomenada Guerra del Francès a la Península Ibèrica.

Aquesta dinàmica de grans batalles puntuals i decisives, però, fou trencada per la revolució industrial. Aquesta va propiciar una vertiginosa expansió tant dels recursos logístics dels grans estats europeus com de la seva capacitat tecnològica, per la qual cosa l'extensió i grandària dels límits d'un camp de batalla es van anar ampliant, fins a possibilitar la creació d'àrees que, com el front occidental durant la Primera Guerra Mundial, establissin un camp de batalla continu al llarg de la frontera dels dos països en conflicte, aconseguint aprovisionar milions de soldats per a guarnir aquesta immensa quantitat de terreny.

Per aquest motiu, doncs, l'anàlisi del terreny segueix essent fonamental per tal

²²Traducció del concepte tècnic anglès *killing zone*, defineix la zona en la qual les armes d'un soldat són efectives per a ferir o matar al rival. Una explicació més àmplia es pot trobar a (Keegan 1994).

d'entendre les campanyes militars de qualsevol època i, per a fer-ho, necessitem entendre el paisatge en la qual aquestes varen tenir lloc. Com es pot intuir és una variable íntimament relacionada tant amb els objectius geoestratègics com en la tipologia dels exèrcits implicats en un conflicte. Aquests dos factors poden explicar en gran mesura el motiu pel qual un enfrontament va succeir en una zona determinada, i al seu torn els accidents geogràfics, geològics i urbans del camp de batalla van tenir un efecte determinant en el propi resultat. Així, per exemple, es pot destacar que durant les guerres d'independència dels Països Baixos contra la corona espanyola dutes a terme als segles XVI i XVII (Creveld 2004, p. 12):

It has been claimed that Spain failed to conquer the Northern Netherlands because there were too many rivers; on their side, the Dutch made no headway in Belgium because there were not enough of them.

Aquesta curiosa reflexió aporta dues dades interessants en l'estudi de la guerra moderna; si els *tercios* espanyols no van poder dominar Holanda a causa de l'existència de rius, que permetien a l'exèrcit holandès establir zones de defensa en profunditat, aquests al seu torn depenien dels rius per al transport logístic d'artilleria i queviures; per tant, sense la presència de rius importants van ser incapaçs d'endinsar-se en la zona de control espanyola, que actualment forma l'estat belga.

A nivell estratègic el territori té, potser, encara més rellevància. A banda de la importància de l'explotació dels recursos naturals de les zones ocupades, les posicions geoestratègiques destacades també són un dels pilars al voltant dels quals es basculen els moviments estratègics, operacionals i tàctics. Sigui per una posició central dins les rutes comercials (per exemple els constants conflictes a on Xipre, les Balears o Malta han canviat de mans), o per controlar rutes de pas especialment rellevants (com els passos dels Pirineus), els diversos accidents geogràfics també són importants objectius dins d'un enfrontament armat. Els rius són barreres fàcilment defensables, així com vies de comunicació i fonts d'aigua per abastir l'exèrcit; les elevacions aïllades són excel·lents observatoris dels moviments de l'enemic i posicions de defensa importants; els ports naturals permeten el transport marítim i l'aixopluc de les flotes, etc.

Al mateix temps, aquests elements també han afectat la visió que ens ha arribat de l'enfrontament per part dels seus protagonistes. Cada font primària, textual o oral, amb informació d'aquest tipus, és una visió diferent del que va passar, i aquests punts de vista entren freqüentment en contradicció. Els motius són variats, doncs existeixen manipulacions per a justificar o enaltir el comportament de qui escriu, així com crítiques als actes d'altres protagonistes. En aquest sentit cal destacar obres com el *Llibre dels Feyts* de Jaume I o els *Comentaris* de Juli Cèsar que, tot i ser textos de referència en quant a la informació que poden proporcionar, al mateix temps són potents elements de propaganda (Jaume Ier 2008; Cèsar 2003).

És especialment complexe l'estudi de batalles amb fonts textuales escasses, com per exemple les de l'antiguitat, o els enfrontaments a petita escala no relatats en les grans històries bèl·liques. Així, a vegades tan sols es té una narració de la batalla, i quan aquesta és redactada amb finalitats propagandístiques, com per exemple els referits *Comentaris* de Juli Cèsar, és molt complex discernir els fets reals de les distorsions de l'autor (Lendon 1999).

Tot i això, hi ha un altre tipus de contradicció que no és necessàriament conseqüència de la intenció d'alterar la descripció de la batalla, doncs persones que hagin viscut un enfrontament de maneres diverses tindran forçosament una perspectiva diferent dels esdeveniments. Aquests punts de vista són en gran mesura fruit del càrrec que l'autor de la font ocupés dins l'exèrcit al qual va pertànyer (no tindrà la mateixa visió un oficial d'alta graduació que un soldat ras), però la zona espacial en la qual es va moure durant la batalla també és un motiu essencial per tal d'explicar contradiccions.

Així doncs, és bàsic millorar la comprensió del territori en el que es va lliurar un enfrontament, tant per raons relacionades amb la investigació pura com per raons divulgatives. Per molt adequades que siguin les descripcions textuales, si no estan firmement suportades per mapes ben elaborats que permetin la identificació dels accidents geogràfics destacats en la narració, difícilment serà aquesta entesa per un lector que no hagi visitat el camp de batalla.

3.7.3 La presa de decisions

El desenvolupament d'un conflicte obeeix una sèrie de regles que, tot i que puguin semblar a priori confuses, tenen una base lògica i racional.

Els objectius estratègics de les forces que controlen un exèrcit (sigui un estat, una aliança entre països, etc.) són els que marquen la seva manera de combatre, així com la seva actitud vers l'enemic.

A nivell tàctic, una batalla no és un element històric aïllat, doncs com qualsevol altre event es va desenvolupar en un lloc i un temps concret, i per una sèrie de causes de tipologia molt diversa. Especialment en èpoques anteriors a la proliferació de la indústria, les batalles es lliuraven tan sols quan els dos bàndols en conflicte volien²³. Les dificultats que comporta situar en una posició apte per a la lluita a desenes de milers de soldats, sense cap mena de telecomunicació, era tan alta que en el temps transcorregut per a fer aquests desplegaments el rival tenia oportunitat d'escapar si així ho decidia. Així, per a cada batalla que hagi succeït ens trobem amb desenes de situacions semblants en les que no va ocórrer cap enfrontament (Goldsworthy 2001, pp. 74-77).

D'altra banda, la visió tradicional i clàssica d'una batalla com a episodi singular, explicat fora del seu context, pateix un greu problema de perspectiva. Coneixent l'esdevenir històric dels fets, i sabent que aquests es varen desenvolupar per un camí determinat, és fàcil caure en el perill de suposar que els fets van ocórrer tal i com havien de fer-ho.

Així, quan aquests fets culminen en una cosa tan important i espectacular com una batalla, és usual concentrar-se en aquest enfrontament sense tenir en compte com es va arribar a ell, sense examinar el que hauria passat si les coses haguessin succeït d'una altra manera (Kegel 1996). És per aquest motiu que, per tal d'analitzar un fet d'aquest tipus és fonamental estudiar els motius pels quals es va arribar a ell des de múltiples punts de vista: requeriments polítics i econòmics, context històric,

²³Existeixen nombroses excepcions a aquesta regla, però; en general són casos en els quals el bàndol que no vol afrontar una batalla està en una situació totalment desesperada i, resumint-ho en una frase, ha perdut l'enfrontament abans d'iniciar-se aquest.

etc.

Seguint amb aquest raonament, els autors actuals intenten evitar la tendència segons la qual la importància d'una batalla ve donada per un càlcul del seu valor com a fet decisiu dins els successos posteriors a ella. Així, la batalla de Valmy (1792) va salvar la Revolució Francesa, Waterloo (1815) és important perquè la derrota de l'emperador Napoleó va motivar la seva abdicació, la batalla d'Anglaterra (1940) va salvar Gran Bretanya de la invasió nazi, etc.

D'aquesta forma s'ha reconsiderat la finalitat de la història militar, tenint en compte que les batalles haurien d'estar explicades dins del seu context, i no com a successos aïllats definitoris que han canviat de cop i volta el devenir històric. Al mateix temps, estudiar les conseqüències d'una batalla en relació als objectius que els seus protagonistes tenien és una forma més apropiada d'investigació que no pas la simple dicotomia Victòria/Derrota emprada normalment (Keegan 1983).

Aquest estudi de les decisions, d'altra banda, ha d'anar lligat a un anàlisi de la capacitat de gestionar les forces i dur a terme aquestes accions (Brynielsson 2006). Aquest sistema, conegut com a Comandament i Control, és un dels elements més importants a l'hora d'estudiar un conflicte, doncs sovint és un component ignorat en la història de la guerra, i que per contra serveix per a explicar els motius pels quals exèrcits molt nombrosos, i amb capacitats tecnològiques superiors, han estat gairebé inútils vers d'altres petits, però amb una estructura de comandament i una organització eficaç. Podem trobar molts exemples d'aquest fet, des de les victòries d'Alexandre el Gran de Macedònia vers l'exèrcit persa (al Granicus, Issus, i especialment a Gaugamela), a la caiguda de l'imperi asteca a mans d'Hernàn Cortés i una petita expedició de soldats espanyols, o els terribles efectes de la *blitzkrieg* o guerra llampec al 1940, quan l'exèrcit alemany aniquilà en un mes les forces armades combinades de França i la Gran Bretanya. Així, caldrà veure com els comandants d'un exèrcit són capaços de traduir les seves decisions en fets dins el combat, tenint en compte que la manera serà diferent en cada període i exèrcit, tenint en compte els factors culturals involucrats (Keegan 1988, p. 11).

A excepció d'avantatges tecnològics puntuals o la presència d'un brillant coman-

dant dirigint a un dels bàndols, el factor més important dins un enfrontament bèl·lic és la qualitat de les tropes que combaten. Tot i això, davant el perill de ser ferit o morir, la immensa majoria de soldats no voldran lluitar, doncs és molt més fort l'instint de supervivència que no pas allò que els impulsa a atacar l'enemic. En aquest context, els soldats només combatran si estan sotmesos a algun tipus de pressió de caire psicològic, com per exemple la por a ser castigats pels seus propis comandants, o bé el fet d'estar defenent la pròpia família o llar. El Comandament i Control d'un exèrcit és, doncs, el que s'encarrega de racionalitzar aquesta problemàtica, tot organitzant les tropes de tal manera que puguin explotar els seus avantatges, i assegurar la confiança i unitat dels soldats (Picq 1921, p. 59).

