

Ba al dauka mugarik matematikak biologian aplikagarria izateko?

Jon Umerez

UPV/EHU

Reception date / Fecha de recepción: 03-05-2009

Acceptation date / Fecha de aceptación: 22-06-2009

Laburpena.

Ezekoa dirudi izenburuko galderari eman behar zaion erantzuna, gutxienez iraultza zientifikoa geroztik, Natura hizkuntza matematikoan idatzita dagoen liburu bat omen denetik. Ikuspegi hori aurrera egingo du eta XX. menderako *harridura alaia* deitu dudana ekarriko du, Wigner 1960-en kasuan eta beste batzuenan ikusten denez. Jarrera hori biologiaren hainbat arloetan aurkitu ditzakegunekin alderatzen dut eta hor lilura hori ez da inondik agertzen eta, gehienez, oso ikuspegi utilitarista bat hartzen da. Bukatzeko, biologiaren erdian bertan daukagun mugagabetasunaren kasu natural agian aipagarriena azaltzen dut modu laburrean: eboluzio mugagabea.

Hitz aipagarriak: Biologia, eboluzio mugagabea, *harridura alaia*, infinitua, matematikak.

Abstract. *Do mathematics have any boundary to be applicable in biology?*

The answer to the title questions appears to be in the negative, at least since the scientific revolution when nature began to be seen as a book written in the language of mathematics. This approach is going to develop further and, by the xxth century, brings forward what I will call a *cheerful amazement* as exemplified in Wigner 1960 and others. I contrast this attitude with those we may find in several areas of biology where the charm is clearly absent and, as much, a very utilitarian approach is taken. I end up with a brief mention to open-ended evolution as a material case of infinity right at the center of biology.

Keywords: Biology, cheerful amazement, infinity, mathematics, open-ended evolution.

1. Sarrera: Apeiron, infinitu, mugagabetasuna.

Apeiron mugagabea esan nahi badu ez da bakarrik gaur eguneko zentzu matematiko ertsian baizik eta zentzu zabalago batean non zehaztugabea ere sartzen den. Beraz, mugarik gabekoa izatea bukaerarik ez izatea den bezala, definiziorik edo determinazio zehatzik ez izatea ere da.

Hortik etorriko al zaio, adibidez, matematikari bere indarra? Zehaztasun guztiarekin baina edozein esparrura zabaltzen ahalbidetzen diona; hau da, inongo ezaugarri zehatz

edo berezirik kontuan hartu gabe, berdin berdin aplikatzen dela, partikularra ahantziz abstrakzioa jorratuz?.

Baina, ba al dauka matematikak mugarik (zentzu batean zein bestean) partikularra aintzat hartu behar duten hainbat zientzietan, biologian esate baterako, aplikagarria izateko?

2. Tradizioak.

2.1. Tradizioa: hizkuntza matematikoa.

Jasotako tradizioan eta autore askoren arabera ezetz dirudi, matematika mugagabea dela edozein zientzien adierazbide gisa, ezin hoberik gainera, dena esateko. Aintzinako Greziaraino jo gabe, zientzia modernoaren sorreran adibidez, askotan gogorarazten zaigun eran, Natura hizkuntza matematikoan idatzita zegoen liburu bat omen zen Galileorentzat. Ondorengo mendeetan ideia hori indartzen joango da nahiz eta harridura sortzen jarraitu. Pozez betetako harridura horren gertuagoko adibideak dira Eugene Wigner-en (1960) eta Warren McCulloch-en (1965) artikulua, bata fisikari begira eta bestea neurofisiologiari. Lan horietatik abiatuta¹ ikuspuntu (sentsazio?) hori azalduko dut.

Harridura alai horren adierazgarri ezinhobea Wigner-en aipamen honetan aurkitzen da

... the two main points which are the subjects of the present discourse. The first point is that mathematical concepts turn up in entirely unexpected connections. Moreover, they often permit an unexpectedly close and accurate description of the phenomena in these connections. Secondly, just because of this circumstance, and because we do not understand the reasons of their usefulness, we cannot know whether a theory formulated in terms of mathematical concepts is uniquely appropriate. (...) Most of what will be said on these questions will not be new; it has probably occurred to most scientists in one form or another. My principal aim is to illuminate it from several sides. The first point is that the enormous usefulness of mathematics in the natural sciences is something bordering on the mysterious and that there is no rational explanation for it. Second, it is just this uncanny usefulness of mathematical concepts that raises the question of the uniqueness of our physical theories. (Wigner 1960, 1)

Harridurari arrakasta gehitzen zaionean ikuspuntu osoa agertzen zaigu eta bere indarra erakusten du zalantzarik gabe:

... it is important to point out that the mathematical formulation of the physicist's often crude experience leads in an uncanny number of cases to an amazingly accurate

1 Hortarako hemen lekurik ez badago ere, artikularen xedetik desbideratu ezean, gaia areago jorratu daieteke Davis & Hersh-en liburu gogoangarriekin (1981, 1986), adibidez, edo berriago batzurekin lagunduta (ad., Lakoff & Nuñez 2000).

description of a large class of phenomena. This shows that the mathematical language has more to commend it than being the only language which we can speak; it shows that it is, in a very real sense, the correct language. (Wigner 1960, 6)

Wignerek Fisikari buruz ari da eta McCullochek Neurologiaz edota Adimen Artifizialaz. Tartean, ordea, zientzien jerarkia tradizionalan behintzat Biologia dugu. Eta zer dio Biologiak? Konpartitzen al du aipatutako harridura alaitik ezer? Ala matematikak beste era bateko ardura sortzen dio?

2.2. Tradizioa: Biologiaren desadostasunak.

Wigner-ek eta McCulloch-ek dituzten helburuen tartean daukagun biologia ez zaigu askotan matematikarekin hain liluratuta agertzen, ez horixe, eta materialitate zehatzaren xehetasunak alde batetik eta historizitatearen kontingentziak bestetik, trataera matematikoen mugak nabarmentzen dituztela dirudi. Zenbateraino baina? Hori da galdera.

Esan behar den lehena da biologiaren aldetik denetik dagoela. Ikuspuntu anitzak daude. Edozein modutan ezaugarri orokor xamar aurkitu daitezke. Hasteko, lilura haundirik ez da behintzat aurkitzen (edo ez orokorra). Hori noski, bekaizkeriak edo inbidiak eragindakoa dela esan genezake (hainbeste aipatzen den zorioneko edo zorigaiztoko “physics envy” famatua). Badaude baita ere, lilura ezatik baino amorrutik edo, gutxienez, azperduratik gehiago dutenak eta beti ari direnak eskatzen utzi dezatela biologiaren eremu bat behintzat beti bezain deskriptibo izaten, garai bateko izaera naturalista mantenduz. Ezintasunaren aldetik begiratzen badugu, agian aurreko bi jarrera hauek gutxitasun konplexua besterik ez dute islatzen. Dena delarik, zalantzarik gabe biologian edozein arlotan eta ikuspuntuan aurkitu dezakeguna ezberdintasunaren ziurtasuna da, zientzia bezala bereizten duena (geroago ikusiko dugunez, fisikatik eta historiatik duena, abstrakzioa eta partikulartasuna beharrezkoak dituena, lege edo arau orokorren alboan salbuespenetik haratago doan batekotasuna onartzen duena,..).

Denetik dagoela esan dugu baina, eta naturalismoa eta deskripzioa dauden eran, tresna eta disziplina matematizatuak biologia garaikidearen sorreratik dauzkagu. Biometristak aipatu ditzazkegu XIX. mendearen bukaeran eta XX.aren hasieran, Darwinen iloba zen Galton-ekin hasita; populazioen genetika estatistikaren euskarri sendoetan abiaraziko dituzten Fisher, Haldane eta Wright, matematikan ondo formatuta dauden biologoak, 1920/30 urteetan, gero urte batzuk beranduago, 1930/1940, osatuko den sintesirako oinarri izango dena. Disziplina osoak, Biologia molekularren hainbat atal edo biokimika eta biofisika osoak, gero eta matematizatuagoak ageri zaizkigu eta, jakina, izenburu esanguratsuak dituzten aldizkariak daude, *Journal of Mathematical Biology* edo *Bulletin of Mathematical Biophysics* bezalakoak.

Baina, biologiaren hainbat disziplinen matematizazio hau ere, beste era batekoa dela esango nuke, guztiz instrumentala bederen. Horrela bada, hemen ez genuke aurkituko harridura alaiaren zantzurik, ez biologiaren arlo formalizatuenean ere, bakarrik erabilgarria eta aproposa suertatzen den tresna bat. Agian halako zerbait esan nahiko zuen Morton Beckner ikertzaileak bere *The Biological Way of Thought* (1968) liburu esanguratsuan, izenburutik hasita. Liburu hau urte batzuk beranduago ofizialki jaioko den gaur egungo biologiaren filosofia estandarraren aurrekari interesgarri bat da. Bere 3. kapituluan, “Models in biology” izenekoan, 4 eredu mota bereizten ditu, horien artean matematikoa, eta hor agerian geratu da, Beckner-en arabera, zerbait gehiago behar dela *matematiko* bihurtzeko:

I shall not be concerned with models in this sense, although developments in evolution theory initiated by Sir R.A. Fisher's classical work, which I shall consider, have been termed “mathematical models”. These developments, I believe, are indeed a case of model building, but in another sense; it is merely accidental that these models also utilize the special mathematical methods of population genetics. One does not call Faraday's force line model a mathematical model simply because mathematical equations figure in electromagnetic theory. (Beckner 1968, 34).

Tresna eta modelo matematikoak erabiltzen dutenen artean ere aurkitu daitezke zuhurtziaren aldeko deiak, adibidez populazioen genetikan aditu handienetako bat den Richard Lewontinek, behin baino gehiagotan kritikatu du tresna matematikoen erabilpen okerra:

The simple analysis of variance is useless for these purposes and indeed it has no use at all. In view of the terrible mischief that has been done by confusing the spatiotemporally local analysis of variance with the global analysis of causes, I suggest that we stop the endless search for better methods of estimating useless quantities. There are plenty of real problems. Lewontin 1974, p. 411 (Levins & Lewontin 1985, p. 122)

Beste adibide sintomatikoak aipatzeko, formalizazioarekin askotan kritiko agertu den eboluzioaren biologian badago zer aurkitu. Horretan etengabe tematu den Ernst Mayr (1904-2005) bezalako lehen mailako izen bat. Bere biologiaren historia mardulean (Mayr 1982) agertzen da dagoeneko eta ondorengo beste hainbat liburuetan errepikatzen da. Liburu horretan, Aristotelesen aurreko pentsamendu grekoari buruz ari delarik eta bere arerio ohiko batez, *esentzialismoa* delakoa, azalpenak ematen dituenean honako hau dio:

... the thinking of Greek philosophy moved more and more toward abstract metaphysics and was increasingly influenced by mathematics, particularly geometry. This was the first of countless episodes in the history of biology where mathematics or the physical sciences exerted a harmful influence on the development of biology. (Mayr 1982, 304)

Ikusten denez, argi eta garbi kaltegarritzat (*harmful*) dauka matematikaren bidez abstrakzioarako joera horrek eragiten duen influentzia. Eta honen osagarri legez, Mayr-ek Biologian Fisika eredu gisa hartzea eta biologian lege eza delakoa aztertzen dituenean ondorengo esango du:

...These misconceptions concerning quantitative and historical sciences, or sciences dealing with systems too complex to be expressed in mathematical formulas, culminated in the arrogant claim that biology is an inferior science. This has led to facile and thoroughly misleading mathematical explanations in various areas of biology (Mayr 1982, 40)

Guzti honekin erakutsi nahi dudana gauza bakarra Mayr-ek (eta beste neurri batean Beckner-ek edo Lewontin-ek) agerian usten digun ezberdintasuna da. Berarentzat (eta beste askorentzat biologian), Wigner-en aurka, matematika hizkuntza BAT besterik ez da (Mayr 1982, 41). Matematikak edo eredu matematikoak ez dira, beraz, sistemaren funtsezko muina edo halako zerbait isladazen dutenak, harridura alaiak aldarrikatzen duen eran, zerbait aszkotik apalagoa baizik, tresna bat besterik ez beste batzuren artean.

Aipamenaz aipamen, beste puntu bat da autoritate argudio moduko bat erabiltzen denean, eta hemen autoritate duena Darwin besterik ezin da izan eta honela Mayr, Hull (1973) aipatuz, “Darwin had a rather low opinion of mathematics” dio (1982, p. 39) (“Darwinek matematikei buruz nahiko iritzi apala zeukan” edo). Hala ere, zehaztu behar dugu benetan Hull-ek honako hau esaten duela:

Although Darwin envied mathematicians their ‘sixth sense’, he also mistrusted them. (...) Darwin could not help but know the crucial role which mathematics had played in physics, (...) but it did not seem to be in the least useful in his own work in biology (Hull 1973, 12)

Darwinen mesfidantza hau, Mayr-ek bere ikuspuntuaren alde gogotsu erabiltzen badu ere, bere garaiko kontestu zehatzean jarri daiteke halaber eta Hull-ek adibidez honako aukera hau aipatzen digu: agian Darwinek sentitzen zuela bere lanerako beharko zuen matematika mota oraindik ez zela existitzen. Hau oso interesgarria da matematika beraren ondorengo garapenei begiratuta eta hurrengo bi ataletan aztertuko dugu.

Puntu hau laburbilduz, Biologiaren hainbat arlo ekuazioz eta eredu teoriko abstraktoez beterik egonik ere, badirudi zerbaitek ihes egiten duela fisikan ez bezala. Organismoen osaketa eta bilakaera zehatzak ezinbestekoak direnean muga horiek agerian geratzen dira. Hortaz, Biologian matematikak fisikan duen garrantzia berdinu ahal izateko gutxienez arazo hauek aurkitzen ditugula aitortu behar dugu:

* Materialitatearen xehetasunak

* Antolaketaren konplexutasuna eta

* Historizidatearen kontingentziak.

Horiekin lotuta baina bestelakoak dira ordea beste arazo zehatzago hauek: lege ezarik bai edo ez, batekotasuna, salbuespenak, eboluzioa edota garapena, ...

3. Sistema konplexuak.

Aurreko ataleko guztia kontuan hartuta, biologiaren egoera gaur egungo zientziaren kontestu zabalago batean jartzen saiatzea komenigarri izan daiteke: sistema konplexu bezala hartzen direnak azalarazten dituzten erronka orokorragoen artean kokatuz. Azken finean, XX. mendearen bukaeran fisikan eta kimikan bertan antzemandako hainbat fenomenok tratamendu matematiko klasikoak kolokan jartzen dituzte, baina hasiera batean pentsatzen zen baino orokorragoak eta ohikoagoak direla onartzeraz iritsi garenez ezin dira salbuespen gisa alde batera uzten jarraitu eta lehendik zeuden tresna batzuk garatuz eta beste berri batzuk eraikiz aurre giten hasi zaie. Fisikan eta kimikan sistema hauek ez linealak, kaotikoak, disipatiboak eta horrelakoak dira.

3.1. Warren Weaver (1948) “Science and complexity”.

Sistema konplexuen eremu hau, nahiz eta zentzu batean modan egon, ez da gaur goizekoa eta hori konfirmatzeko adibide txiki bat besterik ez dut jarriko, fisika eta kimikaren azken mende erdiko historia hona ekartzen ez hasteko. Orain dela 60 urte Warren Weaver zientzilariak eta, batez ere, zientzi politikarako eragin handiko aholkulariak “Science and complexity” izenburuko artikulu programatikoa idatzi zuen. Aurreikuspen horren garrantziaz ohartzeko nahikoa izango da esatea Weaver, dagoeneko aurreko hamarkadan eta batipat gerra garaian eta ondoren, Rockefeller fundazioarako eta gobernuarekin lotutako agentzietarako zientzien bide berriak zehazteaz eta bultzatzeaz eta dirulaguntza banaketaz arduratzen zela (informatika eta zibernetika edo biologia molekularra, bi adibide esanguratsu aipatzearen).

Artikulo horretan zientziaren unean uneko egoera eta aurrera begira espero zitekena eta lehenestea komeni zena aztertzen du. Zientzia aurrean agertzen zaizkigun arazoei erantzunak bilatzeko jarduna bezala ulertzen du eta ikuspegi horretatik abiatuta hiru arazo mota bereizten ditu, hiru zientzi eremu bereizten dituztenak: sinpletasun arazoak (*problems of simplicity*), antolatugabeko konplexutasun arazoak (*problems of disorganized complexity*) eta antolatutako konplexutasun arazoak (*problems of organized complexity*). Sinpletasun arazoak berekin bi aldagai (asko jota 3 edo 4) dakarzenak dira, 1900 aurretiko mekanika klasikoan bezala. Weaver-ren arabera, antolatugabeko konplexutasun arazoei aurre egiten zaie, 1900 eta gero, aldagai kopuru handi bat probabilitate teoriarekin eta mekanika estatistikoarekin tratagarri bihurtzen denean.

It is a problem in which the number of variables is very large, and one in which each of the many variables has a behavior which is individually erratic, or perhaps totally unknown. However, in spite of this helter-skelter, or unknown, behavior of all the individual variables, the system as a whole possesses certain orderly and analyzable average properties. (Weaver 1948, 538)

Antolatutako konplexutasun arazoak, ordea, batez beste eman ezin diezaiokegun tarteko aldagai kopuru bat daukagunean agertzen dira eta, Weaver dioenez, orduan ari ziren aurre egiteko gai izaten hasten.

The really important characteristic of the problems of this middle region (. . .) lies in the fact that these problems, as contrasted with the disorganized situations with which statistics can cope, show the essential feature of organization. (. . .) They are all problems which involve dealing simultaneously with a sizable number of factors which are interrelated into an organic whole. (Weaver 1948, 539).

Gaur eguneko talaiatik begirata, Weaver-en diagnostiko egokia izaten darrai eta, bitxiago izan daitekena, bere orduko aurreikuspena ere. Erdiko eremu horren arazoei gerra garaian martxan jarritako bidetik jarraituta egingo zitzaizela aurre esan zuen: talde interdisziplinaren egitura mantenduz eta konputagailuen garapenari ekinez. Eta halaxe egin zuten ezagutu ditugun emaitzekin.

Bitartean, noski, arazoen sailkapena berrikusi beharko genuela pentsa dezakegu baina, nire iritziz, agian aldatu baino bigarren eta hirugarren motatako arazoen artean beste azpitalde bat gehitzea nahikoa litzateke. Talde horretan sistema disipatiboak (*à la* Prigogine) edota orokorrean auto-antolatzen direnak (*self-organizing*) sartuko genituzke: aldagai askoren batez bestekoa egin, egin daiteke baina baldintza zehatz eta askotan oso berezietan bakarrik.

3.2. Sistema konplexuak. Hainbat ezaugarri orokorrak.

Sistema konplexuen hainbat ezaugarri honako hauek dira:

- Ezinezkoa suertatzen da sistemaren osagaien jokabide indibidualen arabera jokabide globalak deduzitzea (sistema ez-linealak).
- Hasierako baldintzekiko muturreko menpekotasuna, haiengan aldaketa txikiak ere ondorengo jokabideetan izugarritzko aldaera ekar lezakeena (sistema kaotikoak).
- Gertaera disipatiboak edo ordenaren agerpena oreka termodinamikoetik aparteko baldintzetan (*far-from-equilibrium*, sistema disipatiboak).
- Auto-antolakuntzarako propietateak, egoera ezegonkorretik abiatuta egonkortasun kasuen agerpena dakartenak (sistema auto-antolatzaileak)

Arlo psiko-sozialean haratago goaz eta fenomeno erregulatuak, funtzional eta antolatzaile (organizazioa) ugari agertzen dira, baita informazionalak edo sinbolikoak ere. Eta sistema artifizialean ere berezko ezaugarri konplexuak sortu dira (automata zelularrak, sare neuronalak edo algoritmo genetikoak, esate baterako, guzti horietan ordena eta sailkapen fenomenoak erruz ematen ari direlarik).

Jakina, fenomeno guzti hauei aurre egiteko hainbat tresna teoriko edo matematikoak eta, batez ere konputazionalak, asmatzen joan dira. Lehen esan dudan eran, fisikan eta kimikan horrelako fenomenoak (batzuk behintzat) lehendik ere ezagutzen ziren baina trataezinak ziren. Hala ere, salbuespen gisa edo muga bezala hartzen ziren eta hortaz aurrera egin ziteken. Azken hamarkadetan ordea salbuespena izatetik arretaren erdigunera zabaltzen joan dira eta ezin izan direnez gehiago horrela alboratu, trataera egokiak bilatu behar izan zaie. Horretan baliabide konputazionalen aurrerapenak eta disziplinen arteko elkarlana ezinbestekoak izan dira (Weaver-ek zioen bezala). Hor agertu dira hainbat teoria dinamikoak, matematika kualitatiboaren garapena, eredu eta tresna konputazional boteretsuak (bai *hardware* eta *software* aldetik) eta oso gaurkoak diren hainbat arlo berri ere: sistema kaotikoen deskribapena ahalbidetzen duten ekuazioak (Lorentz-ena hasteko), konplexutasunaren zientziak (*complexity sciences* edo *complex systems studies*), bizitza artifiziala, robotika autonomoa, ...

4. Biologia eta Sistema konplexuak.

Esango al dugu, orduan, Hull-en arabera Darwin-i falta zitzaion matematika agertu zaigula azkenean? Neurri batean bai, noski, baina hala ere badirudi berriro ere biologoek ez direla erraz lilurutzen. Begiratu bestela berriro Lewontin-ek, bere azken liburuan zer daukan esateko honelako saio batzuetaz. Redukzionismoa eta holismoa (muturrukoak, nolabait esateko) aztertu ondoren (eta bere posizio dialektikoa berretsi aurretik) beste aukerak aipatzen eta epaitzen ditu:

Another alternative is to search for general systems of explanation of which the diversity of biological phenomena will appear as special cases. Over the last thirty-five years there have been three attempts to bring biological phenomena under the aegis of very general properties of systems that are changing in time: They are the three C-s: catastrophe theory, chaos theory, and complexity theory. All are attempts to show that extremely simple relationships in dynamical systems will lead to what, at first sight, seem unpredictable changes and extraordinary diversity of outcome. (Lewontin 2000, 111)

Baina bera lehengoaren bidetik jarraitzea nahiago eta eszeptizismo horrekin hasierako ezberdintasunera itzuliko digu:

Rather than searching for radically different ways of studying organisms or for new laws of nature that will be manifest in living beings, what biology needs to do to fulfill its

program of understanding and manipulation is to take seriously what we already know to be true. It is not new principles that we need but a willingness to accept the consequences of the fact that biological systems occupy a different region of the space of physical relations than do simpler physico-chemical systems, a region in which the objects are characterized, first, by a very great internal physical and chemical heterogeneity and, second, by a dynamic exchange between processes internal to the objects and the worlds outside them. That is, organisms are internally heterogeneous open systems. (Lewontin 2000, 113-114)

Eszeptizismo hau ez da Lewontin batena bakarrik edo ez dauka zertan bere ikuspegi dialektikoan oinarrituta egon behar. Ezta, derrigorrez, biologiatik fisikarekiko mesfidati agertzen den hainbat posizio redukzionismoaren aurkakoena eta (Mayr-en bidetik) biologiaren autonomia (zientzia gisa) defendatzen dutenena izan behar ere. Beste lerro askoz ere estandarragoetatik ere azaltzen da antzeko eszeptizismo bat, haundiagoa ez bada (alternatiba orokor gisa aldarrikatzen diren berritasunen aurrean, klasikoagoak agertzen duten mesprezu modukoarekin). Horren lekuko Maynard Smith eboluzioaren biologo haundiak Bizitza Artifizialari buruz (eta konplexutasun zientziei buruz) esandakoa: daturik gabeko zientziak zirela esan zuen eta zientzia *poetikoak* deitu. Edo Bizitza Artifiziala moduko disziplinen posibilitateak era baikorrago batean juzkatzen dutenen artean ere, formalismotik (matematizaio hutsatik) dutena da hain juxtu gehien deitoratzen zaiena (ikus, Umerez 2007).

4.1. Sistema biologikoen ezaugarriak.

Orain arte esandakoaren haritik, hiru ataletan laburbildu ditzazkegu biologiarekiko matematikaren mugak agerian uzten dute ezaugarriak: materialitatea, antolaketa eta historizidatea. Orain arte dakigunaren arabera behintzat, izaki biologikoak –bizitza bera–, nolabaiteko menpekotasuna erakusten dute beraien osagarriekiko; hau da, ez dirudi berdin eman dezakela zertaz eginak dauden eta, hortara, (karbonoaren) kimikaren zehaztasunak guztiz baldintzaten dutela bizitza beraren izaera, izan ahal izatea bera. Zelulen metabolismoa eta nekez formalizatu daitekeen makromolekula zehatzen arteko dinamika, horrela eta beste inola antolatuz gero funtzionatzen du, datu guztien arabera. Antolaketa honek berebiziko konplexutasun bat dakar berarekin, hainbat mailen arteko harremana derrigorra egiten duena eta, gainera, kanpotik ezarri gabeko funtzioak betetzen duten zatiak daudelarik; hau da, funtzionalitate inmanente batekin egiten dugu topo. Materia eta antolaketa zehatz hauek, ikerlari askoren arabera, txiripaz eta ez derrigorrez sortutakoak dira, historizidatea bizitzaren muinean sartuz. Hor daukagu bizitzaren sorrera bera eta, hortik aurrera, eboluzioaren alde batera utziezinezko ezaugarri historikoak, kontingentziaz beteriko panorama bat marraztuz.

Hiru multzo horietan integratzen dira, bizitzaren definizio zehatz eta adostu baten ezean, izaki bizidunen izaera jaso nahi duten Lewontinen ezaugarriak –heterogeneitatea eta sistema irekiak izatea– edo, orokorrean, autore askoren bizitzaren ezaugarrien zerrendak, aipatu Mayr-en liburukoa esatebaterako (Mayr 1982, pp. 51-59).

5. “Eboluzio mugagabea”.

Dena den, biologiaren erdian bertan (Dobzhansky-ren *dictum* ezaguna jarraituz gero: eboluzioren argitan ez bada ezerk ez du zentzurik biologian, Dobzhansky 1973) daukagu mugagabetasunaren kasu natural agian aipagarriena: bizitzaren eboluzio mugagabea (*open-ended evolution*, Ruiz-Mirazo, Umerez & Moreno 2008). Mugagabetasun material hau zertan datzan azalduko dut bukatzeko.

Eboluzioaren mugagabetasuna, zentzu intuitibo eta zuzen batean, biziaren sorrerarekin agertzen den lehendabiziko izaki bizidunatik gaurdainoko organismoetara doan ibilbidea adierazten du. Guztiz irekia bezala dakusagun ibilbidea eta edozein aldaera eman dezakena. Are gehiago, ibilbide hori ez da inoiz bukatutzat ematen eta hemendik aurrera ere naturak (ia) edozein motatako izakiak, ez-ezagunak jakina eta imajinatu ere ezin ditugunak, sortzeko gaitasuna duela pentsatzen dugu.

Kontua da ideia intuitibo honetatik nola pasatu gaitezken kontzeptu sendoago batetara. Lewontin-ek esan digu biologiaren programak ulermenean datzala baina manipulazioan ere (organismoena, sistema biologikoena) eta neurri batean horri heltzen zaio gehienetan teoria batean arrakasta aipatu nahi denean: erabilgarria dela gauzak manipulatzeko, gauzak egiteko eta azken finean arrakasta (harrigarri) honetaz hitzegiten zuen Wigner-ek ere.

Ba, zentzu honetan, biologiaren mugagabetasun ebolutiboa sistema artifizialean aztertzen hasi zen von Neumann-ek hortik heldu zion eboluzio mugagabeari (“open-ended evolution”). Ohartu zen izaki biziekiko asimetria sakon bat ematen zela: bizitzaren eboluzioari dakigunaren arabera ematen du izaki gero eta konplexuagoak sortzen direla erreproduktzioz arbasoengatik, baina beste edozein arlo fisiko-kimikoan erreproduktzioa ematekotan gainbeherakoa dela. Ahalmena hori zertan zetzan eta jarrera hori modu eraginkorrean nola irudikatu asmatu behar zuen lehendabizi eta hortarako eredu artifizial eta formaletara jo zuen. Eraiki zituen eredueta automata zelularrak erabili zituen eta hauen auto-antolakuntzan eman zezaketen konplexutasunaren gehikuntza aztertu zuen, mugarik gabeko prozesu bat zein balditzetan ematen zen ikusi nahi zuelarik. Tamalez, gai honi buruz utzi zituen idatziak arretaz erreparatu gero, ez dugu adiera hori –‘open-ended evolution’– bere horretan aurkituko (von Neumann 1948 [1951], 1949 [1966]). Hori horrela izanik ere, konplexutasunaren atalase kritikoa deskribatzen duenean, eztanda egiten duen eraiketa fenomeno bat emango dela aurrez aurre duelarik, oso era esanguratsuan egiten du:

There is thus this completely decisive property of complexity, that there exists a critical size below which the process of synthesis is degenerative, but above which the phenomenon of synthesis, if properly arranged, can become explosive, in other words, where synthesis of automata can proceed in such a manner that each automaton will produce other automata which are more complex and of higher potentialities than itself. (von Neumann 1949 [1966], p. 80)

Aurrerago deskribatzen duen egitura egoki hori (*properly arranged*) kode genetikoaren egitura aurreratzen du eta hortan datza, bi euskarri eta deskripzio bat izatean, eboluzio biologikoaren mugagabetasunaren aukera.

Edozein modutan, automata zelularren tresna konputazional formalak aukera eman bazion auto-erreproduktzioa modu teorikoan aztertzeke eta oso ondorio garrantzitsuak ateratzeko, hala ere konturatzen zen zerbait alde batera uzten zuela eta, bere hitzetan, agian zati garrantzitsuena.

By axiomatizing automata in this manner, one has thrown half of the problem out of the window, and it may be the more important half. One has resigned oneself not to explain how these parts are made up of real things, specifically, how these parts are made up of actual elementary particles, or even of higher chemical molecules. (von Neumann 1949 [1966], p. 77)

Bere garaian zaila badin bazen, gaur egun azterketa material hori egin dezakegu. Helize bikoitzaren egitura 1953an deskribatu zuenean eta geroago, 1960ko hamarkadan zehar, kode genetiko osatzen duten bi makromolekuleen (azido nukleikoak eta aminoazidoak) arteko lotura argitu zuenean, biologia molekularrak prozesu hori ulertzeko tresnak eskura utzi zizkigun. Mugagabetasun material hau banaketa dinamiko horretan oinarritzen da (*dynamical decoupling*, ikus. Ruiz-Mirazo, Umerez & Moreno 2008). Kode baten bidez egiten den azido nukleikoen eta aminoazidoen arteko lotura bitxi horretan datza azken finean eboluzioaren mugagabetasunaren aukera. Beraz, finean, biologiaren mugagabetasuna bera elementu material zehatz batzuk antolatzeke modu kontingente batean oinarritzen da.

Esker ona.

Lan hau egiteko ikerketa-proiektuen hauen laguntza izan dut: GV/EJ IT 250-07 eta MEC (FEDER) FFI2008-06348-C02-01.

Aipamenak.

- Beckner, M. (1968) *The Biological Way of Thought*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Dobzhansky, Th. (1973) Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution. *American Biology Teacher* 35:125-129.
- Davis, Philip & Hersh, Reuben (1981) *The Mathematical Experience*. Boston, MA: Birkhäuser.
- Davis, Philip & Hersh, Reuben (1986) *Descartes' Dream: The World According to Mathematics*. Orlando, FL: Harcourt Brace Jovanovich.
- Lakoff, George & Núñez, Rafael (2000) *Where Mathematics Comes From: How the Embodied Mind Brings Mathematics into Being*. New York: Basic Books.
- Lewontin, R. (1974) The analysis of variance and the analysis of causes. *American Journal of Human Genetics* 26: 400-411 [reprinted in R. Levins & R. Lewontin (1985) *The Dialectical Biologist*, Cambridge, MA: Harvard University Press, pp. 109-122].
- Lewontin, R. (2000) *The Triple Helix: Gene, Organism, and Environment*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Mayr, E. (1982) *The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution and Inheritance*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- McCulloch, Warren (1988 [1965]) What is a Number, that a Man may Know it, an a Man, that he May Know a Number. In Warren S. McCulloch *Embodiments of Mind*, Cambridge, MA: MIT Press, pp.: 1-18 [(the Ninth Alfred Korzybski Memorial Lecture) *General Semantics Bulletin* 26/27: 7-18 (Lakeville, Conn.: Institute of General Semantics)].
- Neumann J von (1948 [1951]) The General and Logical Theory of Automata. In L. A. Jeffress (ed.) *Cerebral Mechanisms in Behavior. The Hixon Symposium*, New York, Wiley, pp. 1-31.
- Neumann J von (1949 [A.W. Burks (ed.) 1966]) *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana, ILL: University of Illinois, Urbana.
- Ruiz-Mirazo, K.; Umerez, J. & Moreno, A. (2008) Enabling conditions for 'open-ended evolution'. *Biology & Philosophy* 23(1): 67-85.
- Umerez, J. (2007) *Vida Artificial: Perspectivas y limitaciones de una biología virtual. Ontology Studies-Cuadernos de Ontología* 7: 204-219.
- Wigner, Eugene (1960) The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13(1): 1-14.