


Hazirik gabeko genomak: DSIaren aroan zientzia irekia eta justizia globala uztartuz

(Seedless Genomes: Bridging Open Science and Global Equity in the DSI Era)

Leire Escajedo San-Epifanio

EU-Frames TransR Ikerketa taldea. Zuzenbide Publikoa eta Zientzia historiko-juridikoen eta Pentsamendu politikoaren saila. Lan Harreman eta Gizarte Langintza Fakultatea, EHU, Leioa, Bizkaia.

LABURPENA: Biodibertsitatearen digitalizazioa eraldatzen ari da landare-baliabide genetikoak ulertzeko eta kudeatzeko dugun modua. Mendeetan zehar hazi fisikoak erabili izan dira —nekazariak gordetakoak, merkatuetan trukaturakoak edo germoplasma-bankuetan zaindutakoak—, baina gaur egun genoma hori informazio digital gisa partekatzen da: ADNaren sekuentziak, nazioarteko gordailuetan biltegitatuak. Biodibertsitatearen “desmaterializazio” horrek, sekuentziazio masiboak, biologia sintetikoak eta adimen artifizialak bultzatuta, aukera berriak irekitzen ditu landare-hobekuntza bizkortzeko eta klima-aldaketaren zein ingurumen-degradazioaren aurrean erresilienteagoak izango diren laboreak sortzeko; baina, aldi berean, dilema juridiko, etiko eta politiko sakonak ere planteatzen ditu. Eztabaidaren muina honakoa da: sekuentzia horiek zientzia irekiko informazio gisa hartu behar al dira, jakintzaren ondasun komun gisa libreki zirkulatu behar dutenak, ala objektu ekonomiko gisa ulertu behar dira, eskubide eskusiboen eta sarbide- zein etekinen banaketa-mekanismoen menpe? 2016az geroztik, Dibertsitate Biologikoari buruzko Hitzarmenaren (CDB) esparruan egindako negoziazioetan koalizio desberdinak aurrez aurre jarri dira: bidezko konpentsazioa aldarrikatzen duten herrialdeak eta komunitateak alde batetik, eta sarbide irekian murrizketen aurka ohartarazten duten zientziaren eta industriaren sektoreak bestetik. NBEk deitutako COP15ean (Montreal, 2022) eta COP16an (Cali, 2024) momentuz emaitza hau izan da: etekinetan parte hartzeko mekanismo aldeaniztun baten diseinua, sarbide irekia babesten duena eta banaketa Etekinen Funtz Global baten bidez kanalizatzen duena. Artikulu honek zientzia irekia eta patrimonializazioaren arteko tentsio hori aztertzen du, eta sekuentzia

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** Leire Escajedo San-Epifanio, EU-Frames TransR IT, Lan Harreman eta Gizarte Langintza Fakultatea (EHU), Sarriena Auzoa z./g., Leioa-Erandio, 48940, Bizkaia.  <https://orcid.org/0000-0002-5776-3055>, leire.escajedo@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: (Adibidea:) Escajedo San-Epifanio, L.(2026). << Hazirik gabeko genomak: DSIaren aroan zientzia irekia eta justizia globala uztartuz >>, Ekaia, 50, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.27943>)

Jasoa: urriak 3, 202x; Onartua: martxoak 25, 2026

ISSN 0214-9001-e-ISSN 2444-3225 / © 2026 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentzian dago

digitalen informazioaren (DSI) gobernantzak landare-aniztasunaren etorkizuna nola baldintzatu dezakeen arakatzen du: jasangarritasun partekatu baterantz ala botere-asimetriaren aro digital berrirantz.

GAKO-HITZAK: *Digital Sequence Information (DSI), biologia sintetikoa, zientzia irekia, sarbidea eta etekinetan parte-hartzea (ABS), nazioarteko gobernantza, landare-baliabide genetikoak, jasangarritasuna*

ABSTRACT:

The digitalization of biodiversity is profoundly transforming the way plant genetic resources are understood and managed. What for centuries circulated as physical seeds—preserved by farmers, exchanged in markets, or conserved in gene banks—is now shared as digital information: DNA sequences stored in international repositories. This “dematerialization” of biodiversity, driven by high-throughput sequencing, synthetic biology and artificial intelligence, offers unprecedented opportunities to accelerate plant breeding and generate crops more resilient to climate change and environmental degradation, but it also raises profound legal, ethical and political dilemmas. The central issue lies in determining whether these sequences should be treated as open scientific information, circulating freely as part of the global commons of knowledge, or as economic objects subject to exclusive rights and access and benefit-sharing (ABS) mechanisms. Since 2016, negotiations within the framework of the Convention on Biological Diversity (CBD) have confronted diverging coalitions: countries and communities claiming fair compensation on one side, and sectors of science and industry warning against restrictions to open access on the other. The outcome, at COP15 (Montreal, 2022) and COP16 (Cali, 2024), was the design of a multilateral benefit-sharing mechanism that preserves open access while channeling redistribution through a global fund. This article examines the tension between open science and the commodification of digital sequence information (DSI), and explores how future governance of these data may shape the destiny of plant diversity: either towards shared sustainability and equity or towards new asymmetries of power in the digital era.

KEYWORDS: Digital Sequence Information (DSI), synthetic biology, open science, access and benefit-sharing (ABS), international governance, plant genetic resources, sustainability

1. SARRERA

Mendeetan zehar, nekazaritza ondare komun batean oinarritu da: hazietan. Germoplasma-bankuak existitu aurretik ere, haziak merkatuetan eta azoketan trukatzeko ziren... eta baita postaz bidalitako gutun-azaletan ere. XIX. eta XX. mendeen artean, David Fairchild botanikari estatubatuarrek milaka barietate —ahuakatea, soja, pistatxoa, besteak beste— sartu zituen Estatu Batuetan, 1898. eta 1920. urteen artean egindako posta-bidalketa eta prospekzio-espeditzioei esker, *The World Was My Garden* (1938) lanean kontatuak [1].

Espedizio zientifikoek hartu-eman hori are gehiago zabaldu zuten. 1920ko eta 1930eko hamarkadetan, Nikolai Vavilovek hirurogei herrialde baino gehiago zeharkatu zituen garia, arroza, artoa eta beste hainbat labore biltzeko, eta Leningraden munduko bildumarik osoenetako bat osatu zuen. Naziak hiria setiatu zutenean (1941–1944), Institutu hartako zenbait ikertzaile gosez hil ziren, zaintzen zituzten haziak ukitu gabe, etorkizuneko belaunaldientzat ondare zirela sinetsita [2].

XXI. mendeak tradizio horren ikur bat aurkitu zuen Svalbard Global Seed Vault-ean, permafrost artikoan induskatua eta 2008ko otsailaren 26an irekia. Munduko nekazaritza-aniztasunaren “segurtasun-kopia” gisa sortua, urtean gutxi batzutan baino ez da irekitzen. 2015eko irailean, Siriako gerraren ondorioz, ICARDA zentroak historiako lehen erretiratzea egin zuen bere bilduma berregiteko: une ikoniko bat, babes-sistema horren balioa erakutsi zuena [3–5].

Bien bitartean, landare-ikerketak norabide digitala hartu du. Sekuentziazio masiboarekin, biologia sintetikoarekin eta edizio genomikoarekin, biodibertsitateak jada ez du bidaiatzen zakuetan edo bialeetan, baizik eta datu gisa. Gaur egun, talde batek gene bat aurki dezake datu-base publiko batean, laborategian sintetizatu eta barietate berri batean txerta dezake, jatorrizko hazia ukitu beharrik gabe. Biodibertsitatearen “desmaterializazioak” A, T, G eta C letrak lehengai unibertsal bihurtzen ditu. Erreferentziazko kalitatezko arrozaren lehen genoma, 2005ean argitaratua, mugarri bat izan zen, zerealetan konparazio eta edizio zehatzari atea ireki ziona [6].

Aldaketa horrek hainbat teknika bultzatu ditu, hala nola CRISPR/Cas, lehortearekiko edo beroarekiko tolerantziarako jada aplikatua [7]; transgene iraunkorrik gabeko edizio iragankorreko sistemak [8]; eta erantzun fisiologiko konplexuak aurreikusteko datu multi-omikoen eta adimen artifizialaren (IA) integrazioak, sentsoreek denbora errealean fenotipatzea ahalbidetzen duten bitartean [9–10]. Guzti hori “Nekazaritza 4.0” deiturikoan txertatzen da, non datu genomikoek eta landa-datuek eredu prediktiboak elikatzen dituzten, hobekuntza-zikloak bizkortuz eta, aldi berean, jasangarritasunari, datuen gobernanzari eta botere teknologikoaren kontzentrazioari buruzko eztabaidak berriz irekiz [11,12].

Baina hazietatik sekuentzietarako trantsizioa ez da soilik teknikoa edo zientifikoa: funtsezko dilema juridiko eta etiko bat ere planteatzen du. Sekuentzia horiek informazio zientifiko gisa ulertu behar al dira, ezagutzaren ondasun komun gisa askatasunez zirkulatu behar dutenak, ala objektu ekonomiko gisa, eskubide eskusiboen eta etekinetan parte-hartzeko mekanismoen (ABS) menpe daudenak? Nazioarteko esparruak —Dibertsitate Biologikoari buruzko Hitzarmena (CDB, 1992), Nagoyako Protokoloa (2010) eta Elikadura eta Nekazaritzarako Baliabide Fitogenetikoei buruzko Nazioarteko Ituna (2001)— material biologikoaren truke fisikorako diseinatu ziren, ez zirkulazio digitalerako. Araudi-hutsune horrek eztabaida global bat ireki du: nola bermatu etekinen banaketa bidezko eta ekitatiboa, berrikuntza gero eta gehiago lineako datu genomikoetan oinarritzen den agertoki batean.

Artikulu honek aldaketa hori bi plano osagarritan aztertzen du. Plano zientifikoan, doitasun-edizioak, biologia sintetikoak eta IAk landare-hobekuntza nola birkonfiguratzeko duten aztertzen da, hazi fisikorik gabe ere. Plano juridiko eta etikoan, berriz, aztertzen da nazioarteko erregimenek digitalizazioaren erronkari nola egiten dioten aurre, eta zein gobernantza-ereduk uztartu ditzaketen zientzia irekia eta ekitatea sekuentzia digitalen aroan.

2. HAZIETATIK SEKUENTZIETARA: BIODIBERTSITATEAREN DESMATERIALIZAZIOA

Mendeetan zehar, baliabide fitogenetikoak objektu material gisa ulertu izan dira. Nekazariak haziak egurrezko kutxetan gordetzen zituzten, botanikariak ale prentsatzuz betetako baulekin bidaiatzen zuten, eta germoplasma-bankuek akzesio (sarrera) fisikoak ganbera hotzetan biltegitzen zituzten. Biodibertsitatea itsasontziz, trenaz edo hegazkinez bidaiatzen zen: Charles Darwinek haziak eta landareak bildu zituen Beagle ontzian 1830eko hamarkadan egindako espedizioan, eta Nikolai Vavilovek planeta erdia zeharkatu zuen 1920 eta 1940 artean gari, arroz eta artoaren bilduma monumentala osatzeko [2].

XX. mendea aurrera eginda ere, materialtasun horrek nagusitu zuen praktika zientifikoa eta lege-erregulazioa. Landareen dibertsitatea eskuratzeko, hitzez hitz, hazi-zaku bat ireki eta erretzen jartzea esan nahi zuen. Svalbardeko Bankuak berak, 2008an inauguratuak, ikuspegi fisiko hori sinbolizatzen du: benetako haziak “Noeren arka” izoztu batean kontserbatzea [3].

Hemen paradoxa bat azaleratzen da. Baliabide genetikoaren gaineko subiranotasun nazionalerako erregimenak, patente ugariak eta eskuratzailerako eskubideak izan arren, ugaltze-materialak oso zabaldua jarraitzen du. Gaur egun edonork eros ditzake haziak Internet bidez, edo supermerkatuko frutetan eta barazkietan aurki ditzake haziak, aldaxkak edo erraboiak, berez material hedagarriak direnak. Sarbide fisiko ez dago benetan blokeatuta; erregimen horiek baldintzatzen dutena da nork erabil ditzakeen lege fitomejoramendurako edo helburu komertzialetarako. Hala, hazia objektu gisa eskura dagoen arren, haren erabilera baimendua gero eta gehiago mugatzen dute jabetza intelektualaren eta subiranotasunaren lege-esparruek.

Aldaketa erradikalena DNAREN sekuentziazioarekin hasi zen. 2000. urtetik aurrera, belaunaldi berriko teknologiei (NGS) esker, genoma osoak irakurri ahal izan ziren, lehen pentsaezinak ziren denboratan eta kostuetan. 2005ean argitaratu zen lehen arroz-genoma, mugarriztatua, milaka aldaera zehaztasunez konparatzeko atek ireki zituelako [6]. Lehen baliabide materiala zena —hazi jakin bat— baliabide digital ere bihurtu zen: A, T, G eta C hizkiz osatutako artxiboa, nazioarteko datu-baseetan gordea. Gaur egun baditugu erreferentziazko genomak ez bakarrik arrotarako, baizik eta garirako, artoarentzat eta hainbat senide basatirentzat ere.

Fenomeno horri biodibertsitatearen desmaterializazioa deritzo. Horrek esan nahi du baliabide baten balio zientifikoa eta praktikoa ez dagoela jada hazi fisikoaren manipulazioaren mende, baizik eta haren informazio genetiko digitalizatuaren kudeaketaren mende. Lehortearekiko tolerantziaren ikerketan interesa duen zientzialari batek ez du hazirik jaso behar postaz germoplasma-banku batetik: ezaugarri horri lotutako sekuentziak kontsulta ditzake, in silico aldaerak diseinatu, eta DNA zatien sintesia enkargatu laborategi batean [13]. Bestela esanda, biodibertsitateak jada ez du bidaiatzen poltsa edo flaskoetan, baizik eta planeta segundotan zeharkatzen duten artxiboetan.

Trantsizio hori are nabarmenagoa egin du biologia sintetikoak. Gaur egun, badaude zerbitzu komertzialak, posta elektronikoz bidalitako sekuentzia batetik abiatuta, aste gutxiren buruan eskatutako genea sintetizatzen dutenak. Zerealetan lehortearekiko erresistentziarekin lotutako geneak ugaltu dira

eta barietate modernoetan berriro sartu, datu digitala nahikoa dela funtzio biologikoa berreraikitzeke frogatuz [14]. Horrela, datuak materia bihurtzen dira, eta informazioaren eta baliabide biologikoaren arteko muga lausotzen da.

Paralelismoek aldaketa dimentsionatzen laguntzen dute. Fisikari batentzat, laborategiko laginak manipulatzeko hutsetik fabrikatu aurretik materialak ordenagailuz simulatzea bezalakoa litzateke. Geologo batentzat, arro batera joan gabe satelite-irudiak aztertzea bezala. Biologiaren kasuan, berriz, horrek esan nahi du informazio digitalak lagin fisikoa ordezkatzeko duela ezagutzaren eta berrikuntzaren abiapuntu gisa.

Ondorioak ez dira soilik teknikoak. XX. mendean, kontserbazioa eta trukea germoplasma fisikoko bankuetan sinbolizatzen ziren; XXI. mendean, berriz, protagonismoa dute GenBank edo EMBL-EBI bezalako plataformek, milioika sekuentzia gordetzen dituzten gordailuek. Trantsizio honek berrikuntza azkartzen du, baina nazioarteko erregimen juridikoak ere proban jartzen ditu, objektu ukigarriak kudeatzeko diseinatuak baitira, ez datu amaigabeki kopiagarriak [15].

Gainera, digitalizazioa doitasun-nekazaritzarekin uztartzen da. Biltegietatik deskargatutako genomak landa-sentsoreekin, droneekin edo satelite bidezko irudiekin konbinatzen dira, eta horien bidez zein landatu, noiz erein edo zer sargai aplikatu erabakitzen laguntzen da. Edizio genomikoa eta nekazaritza digitala uztartze horrek —“Nekazaritza 4.0” deiturikoak— berrikuntzarako aukerak biderkatzen ditu, baina, aldi berean, datuen kontzentrazioari eta botere korporatiboari buruzko dilemak areagotzen ditu [12].

Hau da, biodibertsitatearen desmaterializazioak esan nahi du landare-aniztasuna ez dela soilik ganbera hotz batean gordetako hazien bidez definitzen, baizik eta hodeian zirkulatzen duten informazio genetikoen biten bidez ere. Aldaketa horrek aukera zientifiko handiak irekitzen ditu, baina galdera erabakigarria ere planteatzen du: nola gobernatu jada fisikoa ez den baliabide bat, digitala baizik.

3. Hautespun gurutzaketatik biologia sintetikorantz: 4.0 Nekazaritza

Hazietatik sekuentziatarako trantsizioa ez da aldaketa kontzeptual hutsa: praktikan ere landare-hobekuntzako programak eraldatzen ari da. Lehen gurutzaketa tradizionalak hamarkadak eskatzen zituzten, baina gaur egun urte gutxitan lor daiteke edizio genomikoari, biologia sintetikoari eta adimen artifizialari (IA) esker. Atal honetan, tresna berriek nekazaritza nola birdefinitzen ari diren erakusten duten adibide zehatzak aztertuko dira.

3.1. Edizio genomikoa (CRISPR, TALENak, NGTak)

Iraultza honen teknika enblematikoa CRISPR/Cas9 da, 2012an aurkitua eta 2013tik landareetan aplikatua. Bere abiadura eta zehaztasuna artoaren etxekotzearekin alderatu ohi dira: Mesoamerikako jatorrizko herriek milaka urte behar izan zituzten teosintetik artaburu modernora igarotzeko, baina gaur egun laborategian simula daiteke ikerketa gidatuko hamar urte eskasetan [16]. Oraintsuko adibideek argi erakusten dute potentzial hori. Arrozean, garraiatzaile ionikoak editatu ziren, landareei lur gazietan hazteko gaitasuna ematen dietenak [17]; garian, mildiuariekiko erresistenteak ziren lerroak sortu ziren MLO genearen aleloak ezabatuz [18]; eta tomatean, heltze-prozesuko transkripzio-faktoreak aldatu ziren, uzta osteko bizitza bikoizten zuten fruituak lortuz [19]. Horri gehitu behar zaio Japoniako kasua: 2021ean merkaturatu zen lehen CRISPR bidezko tomatea, GABAn aberastua —hipertentsioa murriztearekin lotutako konposatua—. Sanatech Seed enpresa berritzaileak garatu zuen, eta araudi transgeniko zorrotzetik igaro beharrik gabe baimena lortu zuen; horrek, berehala, etapa berri

honen ikur bihurtu zuen [20]. Beste edizio-teknika batzuk, hala nola TALENak edo NGTak (new genomic techniques), ezaugarri poligeniko konplexuak lantzeko erabiltzen dira. Hala ere, Europar Batasunean oraindik indarrean daude haien hedapena geldiarazten duten arau-esparru murriztaileak, Estatu Batuetan edo Kanadan ez bezala; izan ere, han editatutako landareak kasuz kasu ebaluatzen dira, eta batzuk dagoeneko komertzialki lantzen dira [21].

3.2. Biologia sintetikoa eta geneen sintesia

Biologia sintetikoak are gehiago zabaltzen du panorama. Gaur egun, existitzen diren geneak editatzeaz gain, gene osoak edo ibilbide metabolikoak ere sintetizatzen dira sekuentzia digitaletatik abiatuta. Hala, lehorterearekin erresistentziarekin lotutako geneak sortu dira eta barietate modernoetan txertatu dira, haien erresilientzia hobetzeko, jatorrizko materiala lortu beharrik gabe [14]. Arrozean, karbonoa finkatzeko funtsezko entzimen aldaerak diseinatu dira, fotosintesia optimizatzeko [22]. Tabakoa eta arrosa landare-biofaktoria gisa birprogramatu dira, antigorputzak eta txertoak ekoizteko gai izanik; COVID-19aren pandemian, hainbat proiektu pilotuk frogatu zuten proteina biralak sintetiza zitezkeela saiakuntza klinikoetarako [23]. Halaber, bide metabolikoak berreraiki dira, landareek interes industrial eta farmazeutikoko konposatuak fabrikatzeko: hala nola artemisinina —antipaludiko funtsezko bat— edo zenbait alkaloidak [24]. Aurrerapen horiek agerian uzten dute nola bihur daitezkeen sekuentzia digitalak biologia ukigarri, eta baliabide genetiko gisa ulertzen duguna birdefinitzen ari direla.

3.3. Adimen artifiziala eta big data fitomejoramenduan

Nekazaritzaren digitalizazioak datu-tsunami itzela sortu du: hezetan sentsoreak, droneak, satellite bidezko irudiak, kudeaketa-plataformak... Gakoa da horiek guztiak informazio genomikoarekin integratzea. Ikaskuntza sakoneko algoritmoak esker, aurreran daiteke zein konbinazio genetikok sortuko dituzten landare produktiboagoak, arto eta gari programetan gertatu den bezala [25]. Ganbera hiperespektralak dituzten fenotipatze automatizatuko sistemek aukera ematen dute laboreen egoera denbora errealean monitorizatzeko eta estres hidrikoa edo izurriteak detektatzeko, begi hutsez hauteman aurretik [26]. Asian, arroza hobetzeko programetan, IAk bizkortu egin du etorkizun handiko lerroen identifikazioa, eta hamar urtetik hiru urtera murriztu du barietate berriak lortzeko behar den denbora [27]. Kanadan, nekazariak dagoeneko erabiltzen dituzte plataforma digitalak, datu meteorologikoak, lurrarenak eta haziaren genomarenak gurutzatzen dituztenak, ongarrien dosi zehatzak gomendatzeko; horri esker, kostuak eta emisioak murriztu dituzte [28]. Genomikaren eta IAren konbinazioak jokoaren arauak aldatzen ari da: lehen proba-eta-errore prozesu bat zena, orain prozesu prediktibo bilakatu da.

3.4. Climate-smart? Ingurumenarekiko promesak eta arriskuak

Edizioaren eta digitalizazioaren arloko berrikuntzak “climate-smart” irtenbide gisa aurkezten dira, hau da, baliabideak modu eraginkorragoan erabiliz eta baldintza txarretara egokitutako laboreak sortuz jasangarritasunera bideratutako proposamen gisa [29]. Hala ere, azpiegitura digitaletan kostu ezkutua dituzte: nekazaritza-datuak biltegitzen eta prozesatzen dituzten zerbitzariak energia eta ur kopuru handiak kontsumitzen dituzte, eta datu-zentroen ingurumen-aztarnak industria konbentzionalenaren parekoa izan daiteke [30]. Botere korporatiboaren kontzentrazioak beste arrisku-geruza bat gehitzen du: Bayer, Corteva edo Syngenta bezalako erraldoiek haziak, agrokimikoak, plataforma digitalak eta patenteak aldi berean kontrolatzen dituzte, eta horrek nekazarien menpekotasun teknologikoa areagotzen du [31].

Hala ere, kontrako norabideko ekimenak ere sortzen ari dira. Indian eta Afrikan, fitomejoramendu parte-hartzaile digitaleko proiektuek sekuentzia irekiak eta tokiko nekazariak emandako datuak uztartu dituzte, testuinguru espezifikotara egokitutako barietateak sortuz eta digitalizazioa berrikuntzaren demokratizaziorako bide izan daitekeela erakutsiz [32].

Oro har, edizio genomikoaren, biologia sintetikoaren eta Iaren konbergentziak agertoki eraldatzaile bat marrazten du. Historian lehen aldia da landare-aniztasuna hazi fisikorik gabe manipula daitekeela. Galdera nagusia ez da soilik zer lor daitekeen teknikoki, baizik eta nola bermatu berrikuntza horiek benetan jasangarritasuna indartzen dutela, eta ez dituztela desberdintasun edo mendekotasun berriak errotzen.

4. BIODIBERTSITATE DIGITALAREN GAINEKO NEGOZIAZIO GLOBAL KONPLEXUA: RIKO CDBTIK CALI FUNTSERA

Deskribatutako aurrerapen zientifikoak nazioarteko esparru juridiko batean kokatzen dira, baliabide genetikoak hazi fisikoak ziren mundu baterako diseinatu baitzen. XX. mendearen zati handi batean onartzen zen baliabide horiek gizateriaren ondare komuna osatzen zutela, eta nahiko askatasunez zirkulatzen zutela germoplasma-bankuen, ikerketa-erakundeen eta nekazarien artean [33]. Printzipio hori 1992an aldatu zen, Rio de Janeiron onartutako Dibertsitate Biologikoari buruzko Konbentzioarekin (CDB). Une fundazionala izan zen: lehen aldiz, Estatuak mundu-ordena bat irudikatu zuten, ez soilik jasangarriagoa, baizik eta inklusiboagoa eta ekitatiboagoa ere izan behar zuena. CDBk bizikidetzaren globalerako printzipio berriak proiektatu zituen, gaur egun ere 2030 Agendan eta Garapen Jasangarrirako Helburuetan ageri direnak. Praktikan, ordea, batez ere baliabide genetikoaren gaineko subiranotasun nazionala aitortzea ekarri zuen, sarbidea alde aurreko baimen informatuaren eta etekinetan parte-hartzeko akordioen (ABS) bidez egin behar zela ezarriz [34].

Nagoyako Protokoloak (2010), berretsi duten herrialdeetan soilik aplikatzen denak [ikus taula beheago], printzipio hori garatu zuen, herrialde erabiltzaileetan betearazpen-betebeharrak sartuz [35]. Aldi berean, Elikadurarako eta Nekazaritzarako Baliabide Fitogenetikoei buruzko Nazioarteko Itunak (TIRFAA, 2001), berretsi duten herrialdeetan bakarrik aplikatzen denak, Sistema Aldeaniztuna (MLS) ezarri zuen 64 labore nagusirentzat eta Etekinen Partaidetza Funtsa sortu zuen [36]. Tresna horiek ondare komunaren nozioan aldaketa ekarri zuten, nahiz eta germoplasma-truke material eta ukigarri baterako diseinatuak izan.

Digitalizazioak arkitektura hori guztia proban jarri du. Sekuentzia genomikoek globalki zirkula dezakete transferentzia fisikorik gabe, eta horrek zaildu egiten du haien «jatorria» zehaztea eta, horrekin batera, subiranotasun-klausulak edo etekinen banaketa aplikatzea. Horrela, arau-hutsune bat sortzen da, CDBk eta Nagoyako Protokoloak inspiratu zuten ekitate-printzipioa ondoriorik gabe uzteko mehatxua dakarrena [37]. Biopirateriaren kasuek —hala nola Basmati arroz, neem zuhaitza edo Amazonia aldeko kupuaçu patentatzeko saiakerak— erakusten dute mundu materialean ere onurak nekez iristen zirela komunitate jagoleetara [38–40]. Ingurune digitalean, non datuak mugarik gabe kopiatu eta partekatu daitezkeen, erronka are handiagoa da.

Multilateralismoa, gainera, osatugabea da. CDB ia unibertetsala den arren (196 alde), Estatu guztiek ez dute tresna eratorrietan parte hartzen. Estatu Batuek inoiz ez dute CDB berretsi, eta, beraz,

Nagoyako Protokoloa ere ez; Kanada CDBn eta TIRFAAn dago, baina ez Nagoyan; Israelek CDB eta Nagoya berretsi ditu, baina ez TIRFAA. Are deigarriagoa da zenbait herrialde megaanitz —planetako aberastasun biologiko handiena dutenak— ez direla tresna guztien parte. Argentina, nekazaritza-baliabideetan herrialde nagusietako bat, ez da Nagoyaren kide. Txilek eta Venezuelak ere ez dute berretsi ez Nagoya ezta TIRFAA ere. Horrelako absenteziek murrizten dute eskuratze- eta etekinen banaketako erregimenen eraginkortasuna, gainera, biodibertsitatea aberatsena den lurraldeetan bertan.

1. taula. Biodibertsitateari eta baliabide fitogenetikoei buruzko nazioarteko tresna nagusien berrespen-egoera

Ituna / Protokoloa	Berespen kopurua (2024)	Parte ez diren herrialde nabarmen batzuk	Iruzkina
CDB (1992)	196 alde (ia unibertatsala)	AEB	Baliabide genetikoaren gaineko nazio-subiranotasuna aitortzen du.
Nagoya (2010)	139 alde	AEB, Kanada, Errusia, Txile, Argentina, Venezuela, Kuba	Sarbide- eta etekinetan parte-hartzeko arauak ezartzen ditu (ABS).
TIRFAA (2001)	150 alde	Israel, Txile, Venezuela	64 labore nagusi estaltzen ditu eta Etekinen Partaidetza Funtza sortzen du.

Herrialde megaanitza izateak zer esan nahi duen gogoratzea komeni da. NBGPk (gaztelaniaz, PNUMA) sustatutako kontzeptuak 17 estatu izendatzen ditu, munduko biodibertsitatearen %70 baino gehiago hartzen dutenak. Latinoamerikan hainbat daude: Brasil, Kolonbia, Mexiko, Peru, Venezuela eta Ekuador. Nekazaritza-biodibertsitatean duten pisua funtsezkoa da: Brasil eta Mexiko artoa, juka edo babarruna bezalako laboreen jatorrizko zentroak dira; Andean (Peru, Bolivia, Ekuador) patata eta kinoa dibertsitate handia biltzen da; Venezuelak, berriz, aberastasun handiko ekosistema amazonikoak eta karibearrak gordetzen ditu. Hala ere, herrialde horietako batzuek esparru aldeaniztun guztietan (Nagoya edo TIRFAA, adibidez) erabat parte ez hartzeak pitzadurak uzten ditu sisteman, biodibertsitatea baliotsuena den lekuetan bertan.

Europako testuinguruak beste konplexutasun geruza bat gehitzen du. 1960ko hamarkadatik, EBk landare-ugalketarako materiala arautu du barietate uniformeak eta trazagarriak lehenesten dituzten arauen bidez [41]. Azken proposamen batzuek “material heterogeneoa” edo “kontserbazio-barietateak” bezalako kategoriak sartu badituzte ere, logika nagusiak lehiakortasunera eta homogeneizaziora bideratuta jarraitzen du [42]. Berrikuntza-erregimenak obtentorearen eskubideak (2100/94 Erregelamendua, UPOV) patente bioteknologikoekin (98/44/EE Zuzentaraua) uztartzen ditu. Gainjartze horrek benetako «lizentzia-nahaspilak» sortzen ditu, sarbidea garestitu eta ikerketa-askatasuna mugatzen dutenak, bereziki teknika genomiko berrien (NGT) kasuan [43]. Escajedo San-Epifanio eta

laguntzaileek (2023) erakutsi dutenez, CRISPR bidez editatutako landareen Europako araudiak murriztailea izaten jarraitzen du, eta baikortasunerako tarte gutxi uzten du [44]. Egoera hori kontrastean dago Estatu Batuetan edo Kanadan gertatzen denarekin, han landare editatuak kasuz kasu ebaluatzen baitira eta batzuk merkatura iritsi baitira jada.

Cancúngo COP13tik (2016), DSI lehen aldiz CDBren agendan sartu zenean, Montrealgo COP15era arte (2022), negoziazioak sekuentzien zirkulazioagatik konpentsazio ekonomikoak eskatzen dituzten herrialdeen eta sarbide irekia mantentzearen aldekoen arteko konfrontazioak markatu ditu. Montrealen oinarritzko akordio batera iritsi ziren: etekinetan parte hartzeko mekanismo aldeaniztun bat ezartzea. Caliko COP16ak (2024) urrats erabakigarria eman zuen, Sekuentzia Digitalen Informaziorako Etekinen Funtz Globala sortuz (Cali Funtza) [45]. Funtz horren helburua da onurak modu multilateral eta banantzailean bideratzea, aldi berean datuetarako sarbide irekia babestuz.

Baina itunetako batzuetan egindako aurrerapenek ez dute bermatzen modu orokorrean aplikatuko direnik. Printzipioz, berretsi duten herrialdeen artean baino ez dute balio, eta, gainera, estatu parte-hartzaile batzuek ez dute baztertzen —azken laburpenen arabera— itunetik aldentzea. Azken batean, biodibertsitate digitalari buruzko eztabaidak oraindik ere hazi fisikoen zirkulazioan ainguratuta dagoen lege-esparru baten eta datu digital globaletan oinarritutako praktika zientifikoen arteko tentsioa islatzen du. Tentsio hori nola konponduko den erabakigarria izango da: biologia sintetikoa eta nekazaritza digitala ekitate- eta jasangarritasun-motor bihurtuko diren, ala munduko nekazaritza- eta elikadura-sistemaren ezaugarri izan diren botere-asimetriari indartuko dituzten.

5. ZIENTZIA IREKIA ETA EKITATEAREN ARTEKO TENTSIOAN: BIODIBERTSITATE DIGITALAREN DILEMA ETIKOEN ANALISIA.

Negoiazio-espazio konplexu hori mugatu ondoren, dilema etikoan sakondu dezakegu. Hazietatik sekuentzietara igarotzeak arlo teknikitik edo juridikitik harago doazen auziak planteatzen ditu: justiziari, botereari eta jasangarritasunari lotutako gaiak dira. Haziak ez dira input produktiboak soilik, kultura-ondarea ere badira. Nekazarien eta indigenen komunitateek mendeetan zehar zaindu dute gaur egun gizateria elikatzen duen aniztasuna. Digitalizazioak eta biologia sintetikoak ondare hori laborategi batean sintetizatu, patentatu eta merkaturatu daitekeen informazio bihurtzen dute, eta horrela aldatzen da aniztasuna zaindu dutenen eta orain sekuentzien balio ekonomikoa bereganatzen dutenen arteko harremana [29,34,35,46].

Doitasun-teknologiei buruzko eztabaida —nekazaritza digitala, edizio genomikoa, biologia sintetikoa— oso polarizatua da. Defendatzaileek onura potentzialak azpimarratzen dituzte: lehorte edo izurriteekiko erresistenteak diren laboreak, aplikazio zehatzagoen bidez input kimikoen erabilera murriztea, eta lurzorua zein uraren erabilera eraginkortasun handiagoa. Kritikoek, ordea, ohartarazten dute berrikuntza horiek herbiziden mendeko ereduak iraunarazten dituztela, kostu ezkatuak sortzen dituztela (energia-kontsumo handiko zerbitzariak, hondakin elektronikoak, datu-meatzaritza) eta botere korporatiboa are gehiago kontzentratzen dutela mundu mailako enpresa gutxi batzuen esku [29].

Etekinetan parte hartzeko printzipioa (ABS) asimetria horiek orekatzeko sortu zen, hain zuzen ere. Hala ere, CDBren eta Nagoyaren kontratu-eredu bikoitzek beren mugak agerian utzi dituzte: landare-hobekuntza ekarpen kolektiboen eta epe luzeko mende dago, eta ekarpen horiek ezin dira jatorri bakarrera arte jarraitu [24]. Horregatik, gero eta garrantzi handiagoa hartu dute banaketa-mekanismoek, hala nola FAOren Itunaren Etekinen Partaidetza Funtzak edo DSIrako Cali Funtsek, biak

ere datu genomikoetan oinarritutako berrikuntza berez kolektiboa dela eta irtenbide aldeaniztunak eskatzen dituela aitortzeko diseinatuak [36,45,47].

Asimetrien arazoa, gainera, iparralde–hegoalde edo komunitate–korporazio ardatzetik harago doa. Nekazaritzako ikerketa-sistema bera zeharkatzen du; bertan, unibertsitateak, hobekuntza-zentro publikoak, nekazari-sareak eta enpresa txikiak elkarrekin bizi dira, erraldoi multinazionalekin batera. Horren adibide dira farmer-managed seed systems (FSS), hau da, nekazariak kudeatutako hazi-sistemak. Afrikan eta Asian erabilitako hazien %60 eta %90 artean bermatzen dituzte, hautapen parte-hartzailearen, kontserbazioaren eta tokiko trukearen bidez [48–50]. Afrikako azpisahararren horniduraren %80 inguru dira; Asian, berriz, %60 inguru [51]. Sistema horiek dibertsitate genetikoari eusten diote eta erresilientzia klimatikoa indartzen dute, baina lege-aitorpen mugatua dute. Afrikako ekialdean, FSS hazien merkaturatzea legeztatze saiakerek porrot egin zuten UPOVrekin harmonizatzeko presioengatik eta ziurtapen-mekanismo malgurik ez zegoelako [52]. Nepalen, 1988ko Hazien Legeak eta 1997ko erreformak elementu parte-hartzaileak jaso bazituen ere, haien aplikazioa ahula izan da, baliabide instituzionalik ez zegoelako. Europan, FSSak bazterreko gisa jotzen dira. Suitzan, ProSpecieRara bezalako ekimenek tokiko barietateak berriro merkatu formalera ekartzea lortu dute —supermerkatuetan saltzeraino—. EBn, ordea, esparru murriztailea indarrean jarraitzen du: erregistratu gabeko barietateetatik eratorritako produktuen merkaturatzeak oraindik ere oztopo arau handiak ditu [53].

Marjinaltasun hori ez dator bat EBn landare-obtentoaren eskubideek duten zentraltasunarekin, 1991ko UPOVren logikari erantzuten baitiote. CPVR sistemak eskatzen du barietateak desberdinak, uniformeak eta egonkorak (DUS) izatea, eta aldi baterako eskubide esklusiboak ematen dizkie, bi salbuespenek orekatuta: eskuratzailaren salbuespena, babestutako barietate bat beste berri batzuk sortzeko erabiltzeko aukera ematen duena, eta nekazariaren pribilegioa, baldintza jakin batzuetan hazia berrerabiltzeko baimena ematen duena. Teorian, oreka horrek berrikuntza sustatzea du helburu. Praktikan, ordea, uniformitate-eskakizunek tokiko barietateak eta material heterogeneoak baztertu dituzte [54,55]. 2023ko PRM Erregelamenduaren proposamen berriak ere, “material heterogeneoa” eta “kontserbazio-barietateak” kategoriak sartzen dituen arren, estandarizazioaren logika errepikatzen duten marjina estuetan egiten du [56]. Europan nagusi den joera argia da: nekazariak, pixkanaka, “hazien kontsumitzaile” bihurtzen dira, berrikuntzako edo kontserbazioko subjektu aktibo izateari baino gehiago [57].

Biopirateria digitalaren arriskua ere adibide adierazgarria da. GenBank bezalako oinarriek zientzia demokratizatzen dute, baina aldi berean aukera ematen dute barietate tradizionaletatik eratorritako sekuentziak errekonozimendurik eta konpentsaziorik gabe erabiltzeko. Horrek bi balio nagusi talka egiten ditu: zientzia irekia, ikerketa sustatzen duena, eta ekitatea, biodibertsitatea gorde dutenentzat justizia bilatzen duena [37]. Andeatako kinoa da horren adibide paradigmaticoa: Estatu Batuetan 1990eko hamarkadan patentatua izan zen, nahiz eta Andeatako komunitateek mendeetan landu zuten. Gaur egun oraindik gogoratzen da espropiatze bidegabearen sinbolo gisa, orain eremu digitalera lekualdatua [38].

Botere-dinamikek egoera are larriago bihurtzen dute. Lau enpresak —Bayer, Corteva, Syngenta eta BASF— aldi berean kontrolatzen dituzte haziak, agrokimikoak, plataforma digitalak eta patenteak, eta horrek nagusitasun bat ematen die, bai ikerketa norabidetzeko bai jasangarritasunari buruzko diskurtsoa markatzeko [39]. Horren aurrean, ordea, subiranotasun teknologiko eta datu-subiranotasuneko ekimenak sortzen ari dira: nekazaritza-makineria digitalizatuaren konpontzeko eskubidearen aldeko mugimendua, kode irekiko hazi-sareak eta datu komunitarioen plataformak, informazioa partekatzea ahalbidetzen dutenak haren erabileraren gaineko kontrola galdu gabe [29].

Alternatiba hauek erakusten dute, nahiz eta doitasun-teknologiek kontzentrazioa indartu ohi duten, erresistentziarako eta berrikuntza sozialerako espazioak ere ireki ditzaketela.

Azken finean, biodibertsitate digitalaren dilema ez da soilik datuetarako sarbidea arautzera mugatzen. Funtsean, erabaki behar da sekuentziarako trantsizioa inklusiorako, aintzatesperako eta jasangarritasunerako tresna izango den, ala nekazaritzako elikadura-sistemaren egitura-asimetria historikoak indartuko dituen. Zailtasuna da alde guztientzat bidezko eta orekatua izango den marko bat diseinatzea: informazioaren irekitasuna zainduko duena zientziaren oinarri gisa, baina aldi berean eragileen aniztasuna birbanatzeko eta aitortzeko mekanismo eraginkorrak bermatuko dituen, hazien nekazaritza-sistemetik hasi eta ikerketa-zentro publikoetaraino.

6. EZTABAIDAN JARRERA HARTZEA. BIDEZKO OREKA POSIBLE AL DA? GOBERNANTZA INKLUSIBORAKO IBILBIDEAK

Landare-biodibertsitatearen digitalizazioak erronka nagusi bat planteatzen du: nola bermatu sekuentzia digitaletan oinarritutako berrikuntzak jasangarritasuna bultzatzen duela, nekazaritza industrialaren botere-asimetriak berriz sortu gabe? Ez da dilema binario bat: berrikuntza eta ekitatea elkarren aurkakoak izan beharrean, elkar indartu ditzakete, baldin eta erakunde eta arau-esparru egokiak diseinatzen badira. Kontua ez da soilik nola banatu onurak estatuen artean, baizik eta nola aitortu aniztasunaren benetako zaindariak —nekazariak, komunitate indigenak eta ikertzaile publikoak— bidegabeko espropiatze arrisku gero eta handiagoaren aurrean, bai nazioartean, bai herrialde bakoitzaren barruan.

6.1. Etekinetan parte hartzeko mekanismo aldeaniztunak indartzea

FAOren Funtzak eta DSIrako Cali Funtzak (COP16, 2024) logika-aldaketa bat ekarri dute: jarraitzeko zailak diren transakzio bilateraletatik eskema kolektiboetara igarotzea, belaunaldiz belaunaldi biodibertsitatea gorde dutenei etekinak birbanatzen dizkietenak [36,45]. Funtz horiek oraindik apalak dira —FAOrenak 2007tik ehunka milioi baino ez ditu bildu—, baina banaketa bidezkoagoa eraikitzeko oinarri sendoa osatzen dute. Nekazaritza-aseguruek guztion ekarpenekin poltsa komun batean funtzionatzen duten bezala, sekuentzietan oinarritutako berrikuntza digitalak ere mekanismo solidario eta banatzaileak behar ditu, aniztasuna sortzen eta mantentzen dutenengana baliabideak bideratzeko gai izango direnak, nahiz eta merkatu globaletan zuzenean parte hartzeko gaitasunik ez izan.

6.2. Jabetza intelektualari eta hazi-merkatuei eragiten dien araudia egokitzea

Jabetza intelektualaren arloan, eraberritzeko leihoak irekitzen ari dira. Europako landare-ugalketarako materialari buruzko araudian “material heterogeneoa” edo “kontserbazio-barietateak” kategoriak sartzeak nekazaritza-sistemak aintzatestea dakar, mugatua bada ere [56]. Patenteen sisteman ikerketarako eta breedingerako salbuespenak zabaltzeak gaur egun berrikuntza publikoa eta komunitarioa oztopatzen duten lizentzien “nahaspilak” murrizten lagunduko luke [32]. Helburua da berrikuntza ez harrapatzea “antikomunen tragedia” batean, non eskubide eskusiboen ugaritzeak guztion onerako sekuentzien erabilera blokeatzen baitu.

Argigarria da 1940ko hamarkadako arto hibridoaren adibide historikoa: Estatu Batuetan azkar hedatu zen, haziak libreki zirkulatzen zirelako unibertsitateen eta kooperatiben artean. Patente zorrotzen inguruan itxitako ekosistema batek askoz motelduko zuen iraultza hura. Kontrara, gaur egungo Europar Batasuneko joera da nekazaria “hazien kontsumitzaile” gisa birkokatzea, eta, pixkanaka, dibertsitatearen berritzaile eta zaintzaile gisa duen eginkizuna kentzea [57].

6.3. Nekazaritzako datuen eta datu genomikoen gobernantza

Nekazaritza digitala eta biologia sintetikoa datu-fluxu masiboen mende daude: sekuentzietatik hasi eta satellite-irudietaraino edo eremu-sentsoreetaraino. Arazoa ez da soilik teknikoa, baizik eta gobernantzakoa. Ustiatogietan sortutako datuak zerbitzari korporatiboetan biltegitzen badira, nekazariak baztertuta geratzen dira beraiek sortzen duten balioetik.

Hori saihesteko, datuen justizia (data justice) deritzen ekimenak garatzen ari dira, titulartasunari, adostasunari eta eramangarritasunari buruzko arau argiak eskatuz [29]. Jada badaude adibideak: Frantzia, 2020an, nekazaritza-datuen kooperatiba bat sortu zen, nekazariari aukera ematen diena kolektiboki erabakitzeko nola erabili beren datuak; India, klima- eta labore-datuen gordailu komunitario batek arrozari eta artatxikiari buruzko programak sostengatzen ditu, nekazarien gobernantzan eta sarbide irekiaren bidez [54]; Kanada, berriz, traktore digitalizatuak “konpontzeko eskubidearen” aldeko mugimenduek subiranotasun teknologikoa eta nekazaritzako subiranotasuna lotu dituzte. Suitzan, ProSpecieRara bezalako ekimenek tokiko barietateak berriro merkatu formalera ekartzea lortu dute —supermerkatuetan saltzeraino—. EBn, ordea, esparru murriztailea indarrean jarraitzen du: erregistratu gabeko barietateetatik eratorritako produktuen merkaturatzeak oraindik ere oztopo arau handiak ditu [53].

6.4. Jakintzen eta aktoreen aniztasuna aitortzea

Gobernantza inklusiboak beharrezkoa du aitortzea dibertsitate genetikoa ez dela bioteknologiaren objektu soil bat. Nekazariak eta komunitate indigenek mendeetan zehar izan dute hazien zaintza eraginkorra. FAOren Tratatuaren 9. artikuluan jasotako eskubideen artean daude haziak gordetzea, trukitzea eta saltzea, bai eta erabakiak hartzean parte hartzea ere [26]. Hala ere, herrialde askotan eskubide horiek mugatu egiten dituzte derrigorrezko ziurtapen-erregimenek eta jabetza intelektuaren presio gero eta handiagoek.

Jakintza horiek integratzea ez da soilik justizia-agindu bat, baizik eta klima- eta elikadura-erresilientziarako baldintza praktikoa. Esperientziak erakutsi duenez, nekazaritza-sistemek, tokiko nahasketak eta barietateak landatuz, erresilientzia sortu dute ingurumen-izurriteen edo -aldaketen aurrean [48]. Aro digitalean, haien inklusioak berrikuntza aberastu dezake benetako dibertsitate genetikorekin eta kokatutako ezagutzarekin.

Laburbilduz, berrikuntzaren eta ekitatearen arteko oreka justua lortzea ez da ezinezkoa, baina erabaki politiko eta instituzional kontzienteak eskatzen ditu. Horretarako, informazio genetikorako sarbide irekiari eutsi behar zaio zientziaren eta lankidetzaren motor gisa, baina aldi berean birbanaketa-mekanismo eraginkorrekin osatuta, biodibertsitatearen benetako zaindariak aitortuak izan daitezten. Sistema gobernuen arteko transakzioetara mugatzen bada, baztertzen jarraituko ditu egunero nekazaritza-aniztasunaren kontserbazioa eta berritzea egiten dituztenak.

7. ONDORIOAK. HAZIRIK GABE, GENOMA ESKUAN: AUKERAK ETA ARRISKUAK, JUSTIZIA BETI ZAIN

Landare-baliabide genetikoak informazio digital bihurtzeak aro-aldaketa nabarmena ekarri du zientzian eta biodibertsitatearen politikan. Hazietatik sekuentzietara egindako trantsizioa ez da biraketa tekniko hutsa: nekazaritzako elikadura-sistemetan kontserbazioa, berrikuntza eta ekitatea ulertzeko modua birdefinitzen du.

Biodibertsitatearen desmaterializazioak aukera berriak irekitzen ditu: edizio genomikoa bizkortzea, biologia sintetikoa eta adimen artifiziala integratzea, eta klima-aldaketaren eta ingurumen-degradazioaren aurrean erresilienteagoak izango diren laboreak sortzea ahalbidetzen du. Baina, aldi berean, garrantzi handiko dilemak ere planteatzen ditu. Mendeetan zehar aniztasuna zaindu dutenen subiranotasunak arriskua du datu genomiko globalen merkatu batean diluitzeko. Onuren banaketa zalantzazkoa bihurtzen da genomak fitxategi digital gisa zirkulatzen direnean. Eta boterea korporazio gutxi batzuen inguruan kontzentratzeak dagoeneko sakonak diren desberdintasunak larriagotzea mehatxatzen du.

Eztabaidak teknologiaren anibalentzia agerian uzten du. Defendatzaileek inputak murrizteko, klima-aldaketari aurre egiteko eta produktibitatea handitzeko tresna gisa aurkezten duten bitartean, kritikariek ingurumen-arriskuei, mendekotasun teknologikoari eta desberdintasunei buruz ohartarazten dute. Tentsio horrek erakusten du baliabide genetiko digitalen gobernantza, aldi berean, gai zientifikoa, politikoa eta etikoa dela.

Berrikuntzaren eta ekitatearen arteko oreka, ordea, posible da oraindik. Onuretan parte hartzeko mekanismo aldeaniztunak, sarbide-oztopoak murrizten dituzten jabetza intelektualeko erreformak eta nekazariak zein komunitateek bultzatutako datuen gobernantza-ereduak dira digitalizazioa ikuspegi inklusiboetara bideratzeko adibideak. Landare-aniztasunaren etorkizuna zientzia, politika eta justizia uztartzeko gaitasunaren arabera izango da, baliabide digitalak gizateriaren ondare komunaren parte direla aitortzen duten erakunde berrien bidez.

Ahalegin kolektibo hori gauzatzen bada, “*Hazirik gabe, genoma eskuan: guztion eskura, guztion onerako*” leloa benetako jasangarritasun partekatuaren promesa bihur liteke. Bestela, digitalizazioak asimetriak indartzeko eta elikadura-subiranotasuna ahultzeko arriskua du. Dilemak luze iraungo du, baina justiziaren alde lan egitea ere oraindik posible da: biodibertsitatearen iraultza digitala berrikuntza eta ekitatea eskutik aurrera doazen mundu baterantz bidera daiteke.

ESKER ONAK

Lan hau hainbat ikerketa-proiekturen esparruan egin da: VegEquity, Plant Breeding and European Integration (PID2021-123796OB), Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioak finantzatua; Research Group GIU24/007 EU-Frames, "Constructing Innovative Regulatory Frameworks in the EU," L. Escajedo San-Epifanio eta I. Filibi zuzendaritzapean; eta Jean Monnet Module PlantSciLaw – European Law and Governance for the Agrosociences (Erasmus+), Europako Batzordeak finantzatua (dirulaguntza-kodea: ERASMUS-JMO-2023-MODULE 101127121).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fairchild D. *The World Was My Garden: Travels of a Plant Explorer*. New York: Charles Scribner's Sons; 1938.
- [2] Pringle P. *The Murder of Nikolai Vavilov: The Story of Stalin's Persecution of One of the Great Scientists of the Twentieth Century*. New York: Simon & Schuster; 2008.
- [3] Crop Trust. *Svalbard Global Seed Vault: programme and functioning*. Bonn: Global Crop Diversity Trust; 2020.
- [4] Crop Trust. *Syrian war causes the Global Doomsday Seed Vault's first withdrawal*. Bonn: Global Crop Diversity Trust; 2015.
- [5] NordGen. *Withdrawal of ICARDA seeds accomplished*. Alnarp: Nordic Genetic Resource Center; 2019.
- [6] International Rice Genome Sequencing Project. The map-based sequence of the rice genome. *Nature*. 2005;436:793–800.
- [7] Chen K, Li S, Yang Y, Sun Y, Yang B. Advances in CRISPR/Cas-based genome editing for cereal crops under abiotic stress. *Front Plant Sci*. 2024;15:1478398.
- [8] Gu D, Zhang J, Xie Y, Li J. Transgene-free genome editing in plants using transient expression systems. *Front Genome Edit*. 2021;3:805317.
- [9] Cembrowska-Lech D, Lechowicz K, Sowiński P, Kępczyńska E. Integration of multi-omics and artificial intelligence approaches in horticultural crop research. *Plants*. 2023;12:2985.
- [10] Su J, Hou J, Liu J, Zhao C. AI-assisted phenotyping for real-time monitoring of crop growth and stress responses. *Front Plant Sci*. 2023;14:1215899.
- [11] Custers R, Dima S. *STOA Report: Genome-edited crops and 21st century food systems challenges*. European Parliament, EPRS., European Parliament; 2022.
- [12] Clapp J, Ruder SL. Tecnologías de precisión para la agricultura: agricultura digital, cultivos editados genéticamente y la política de la sostenibilidad. In: Escajedo San-Epifanio L, et al. (arg.). *Edición genómica de las plantas y desmaterialización de los recursos fitogenéticos: desafíos para la gobernanza global*. Madrid: Dykinson; inprenta, 2025.
- [13] Halewood M, Chiurugwi T, Sackville Hamilton R, et al. Plant genetic resources for food and agriculture: opportunities and challenges emerging from the science and information technology revolution. *New Phytol*. 2018;217:1407–19.
- [14] Xu Y, Li P, Zou C, et al. Enhancing crop drought tolerance by synthetic biology approaches. *Plant Biotechnol J*. 2021;19:1247–60.
- [15] Sirakaya A. Digital sequence information and its impact on access and benefit-sharing. *J Environ Law*. 2019;31:459–83.
- [16] Miao C, Xiao L, Hua K, et al. Mutations in a Na⁺ transporter improve rice salt tolerance. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2018;115:E2235–43.
- [17] Wang Y, Cheng X, Shan Q, et al. Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers powdery mildew resistance. *Nat Biotechnol*. 2014;32:947–51.
- [18] Yu Q, Liu S, Yu L, et al. CRISPR-based editing of transcription factors extends tomato shelf life. *Nat Biotechnol*. 2022;40:390–8.
- [19] Ishii T, Araki M. Commercial cultivation of genome-edited crops in Japan: present status and future prospects. *Front Plant Sci*. 2022;13:888177.

- [20] Escajedo San-Epifanio L, Filibi I, Lasa-López A, Puigdomènech P, Uncetabarrenechea Larrabe J. Possible EU futures for CRISPR-edited plants: little margin for optimism? *Front Plant Sci.* 2023;14:1141455.
- [21] South PF, Cavanagh AP, Liu HW, Ort DR. Synthetic biology redesign of photosynthesis. *Plant J.* 2019;97:56–75.
- [22] Capell T, Twyman RM, Armario-Najera V, Ma JK, Schillberg S, Christou P. Potential applications of plant biotechnology against SARS-CoV-2. *Trends Plant Sci.* 2020;25:635–43.
- [23] Smolke CD. Building outside of the box: iGEM and the BioBricks Foundation. *Nat Biotechnol.* 2009;27:1099–102.
- [24] Crossa J, Pérez-Rodríguez P, Cuevas J, et al. Genomic selection in plant breeding: methods, models, and perspectives. *Trends Plant Sci.* 2017;22:961–75.
- [25] Singh A, Ganapathysubramanian B, Singh AK, Sarkar S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends Plant Sci.* 2016;21:110–24.
- [26] Varshney RK, Bohra A, Yu J, et al. Designing future crops: genomics-assisted breeding comes of age. *Trends Plant Sci.* 2021;26:631–49.
- [27] Rotz S, Duncan E, Small M, et al. The politics of digital agricultural technologies: a critical perspective. *Can Food Stud.* 2019;6:31–47.
- [28] Cotter J, Perls D. *Gene-edited organisms in agriculture: risks and concerns*. Greenpeace Research Laboratories Report; 2018.
- [29] Dauvergne P. The environmental impacts of digital technologies in agriculture. *Glob Environ Polit.* 2022;22:78–101.
- [30] Howard PH. Concentration and power in the global seed industry. *Sustainability.* 2016;8:409.
- [31] Glowka L, Burhenne-Guilmin F. *Guide to the Convention on Biological Diversity*. IUCN; 1994.
- [32] CBD (Convention on Biological Diversity). *United Nations Treaty Series*, 1760 UNTS 79; 1992.
- [33] Morgera E, Tsioumani E, Buck M. *Unravelling the Nagoya Protocol*. Brill; 2014.
- [34] ITPGRFA. *International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. Rome: FAO; 2001.
- [35] ITPGRFA. *The Benefit-Sharing Fund: Report 2009–2023*. Rome: FAO; 2023.
- [36] Shiva V. *Stolen harvest: The hijacking of the global food supply*. South End Press; 2000.
- [37] Kloppenburg JR. *First the seed: The political economy of plant biotechnology*. 2nd ed. Madison: University of Wisconsin Press; 2005.
- [38] ETC Group. *Who Will Own the Biodiversity in the Cloud?* Ottawa: ETC Group; 2022.
- [39] Louwaars NP. Plant reproductive material legislation in Europe: diversity versus harmonization. *Front Plant Sci.* 2018;9:1992.
- [40] Louwaars N, Visser B. Plant reproductive material regulation: Balancing uniformity and diversity in the European Union. *J Agric Environ Law.* 2021;16(31):7–25.
- [41] Escajedo San-Epifanio L, Filibi I, Lasa-López A, Puigdomènech P, Uncetabarrenechea Larrabe J. Possible EU futures for CRISPR-edited plants: little margin for optimism? *Front Plant Sci.* 2023;14:1141455.
- [42] CBD COP16. *Decision on digital sequence information*. Cali: Secretariat of the CBD; 2024.

- [43] Bagley MA. De-materializing genetic resources: Synthetic biology, intellectual property and the ABS bypass. In: McManis CR, Ong B, eds. *Routledge Handbook of Biodiversity and the Law*. Routledge; 2018. p. 219–24.
- [44] Dempewolf H, Halewood M. After the Nagoya Protocol: Intellectual property and access to plant genetic resources. *Front Plant Sci*. 2019;10:1102.
- [45] McGuire S, Sperling L. Seed systems smallholder farmers use. *Food Security*. 2016;8(1):179–95.
- [46] Sperling L, Almekinders C. Informal commercial seed systems: Leave, suppress or support them? *Sustainability*. 2023;15(18):14008.
- [47] FAO. *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Rome: FAO; 2019.
- [48] Kilwinger FBM, Westengen OT, Hoekstra F, Visser B, Almekinders C. Unpacking legal spaces in East African seed law: Opportunities and constraints for recognizing farmer-managed seed systems. *Glob Environ Change*. 2025;79:104395.
- [49] ProSpecieRara. *Annual report 2021/22*. Basel: ProSpecieRara Foundation; 2022.
- [50] European Commission. *Proposal for a Regulation on the production and marketing of plant reproductive material in the Union* (COM(2023) 414 final). Brussels: European Commission; 2023.
- [51] Singh RK, Singh A, Varshney RK. Democratizing agricultural data: Farmer-led models for open innovation in crop improvement. *Food Policy*. 2022;110:102317.
- [52] Schön H, Braunschweig T. Balancing breeders' rights and farmers' rights in Europe. *Eur Intellect Prop Rev*. 2020;42(11):683–9.
- [53] Bradford A. *The Brussels Effect: How the European Union rules the world*. Oxford: Oxford University Press; 2020.