

# Fitoerremediazioa lurzoru kutsatuen kudeaketa iraunkorrerako estrategia gisa

*(Phytoremediation as an strategy for sustainable management of contaminated soils)*

María Teresa Gómez-Sagasti<sup>1\*</sup>, Lur Epelde<sup>2</sup>, Oihana Barrutia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Landare Biologia eta Ekologia Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea UPV/EHU

<sup>2</sup>Baliabide Naturalen Kontserbazioa Saila, NEIKER-Tecnalia,

<sup>3</sup>Matematikaren eta Zientzia Esperimentalen Didaktika Saila, Hezkuntza, Filosofia eta Antropologia Fakultatea (Irakasleen Eskola) UPV/EHU,

\*mariateresa.gomez@ehu.es

*Jasoa: 2018-05-08*

*Onartua: 2018-09-20*

**Laburpena:** *Iraunkorrak eta (eko)toxikoak izan ohi diren konposatu ez-organiko eta organikoen isurketa masiboek potentzialki kutsatuta egon daitezkeen lurzoruen kopurua zorrozki igo dute. Lurzoruen osasuna (funtzionalitatea) eta kalitatea (emankortasuna) arrisku larrian egoteak eta, ondorioz, giza biziraupena estutasunean jartzeak, lurzoru kutsatuen kudeaketa eraginkorra mundu mailako ingurumen politiken premiazko xede izatea bultzatu dute. Gaian sartuta, lan honen helburu nagusiak hurrengoak dira: (i) lurzoru kutsatuen kudeaketaren lege eta jarduera markoa aurkeztea; (ii) lurzoru kutsatuen kudeaketa eta arriskuen ebaluazioa aztertzea eta; azkenik, (iii) ohizko erremediazio teknika suntsitzailen aitzinean, fitoerremediazioaren arloan egiten ari diren esfortzu zientifiko-teknikoak argira ekartzea. Lurzoru kutsatuen kudeaketan aurrerapenak lor daitezzen landu beharreko hariak ere laburki iruzkintzen dira.*

**Hitz gakoak:** lurzoria, kutsadura, fitoerremediazioa, osasuna, bioindikatzailak, gizarte-inpaktua.

**Abstract:** **The massive emissions of persistent and (eco)toxic inorganic and organic compounds have drastically increased the number of potentially contaminated soils. As soils' health (functionality) and quality (yield), which in turn compromise human survival, have been seriously endangered, the effective management of contaminated soils has become a priority objective for global environmental policies. Thus, the main objectives of the present work are: (i) introduce the legal framework for the management of contaminated soils; (ii) analyse the management and risk assessment of contaminated soils and; finally, (iii) in front of conventional destructive techniques, clarify the scientific**

**and technical advances that are being carried out in the field of phytoremediation. The topics to be developed in order to progress in the management of contaminated soils are also briefly exposed.**

**Keywords:** soil, contamination, phytoremediation, health, bioindicators, social impact.

## **1. SARRERA: LURZORUEN FUNTZIOAK ETA JASATEN DITUZTEN MEHATXUAK**

Azken mendean zehar, munduko biztanleria ia laukoiztu egin da. **Leherketa demografiko** honen giltzarriak, nekazaritzan eta industrian eman diren aurrerakuntza zientifiko-teknologikoak dira. Giza-ongizatearen hobekuntzak egungo **hiperkontsumoa** areagotu du (bai elikagaiena, energetikoa zein teknologikoa) eta, aldi berean, industrializazioan eta elikagaien ekoizpenean etengabeko presioa ezarri du. Are gehiago, garapen iraunkorrari buruz argitaratu diren azken txostenek gizadiak planetaren jasate-ahalmena dagoeneko gainditu duela azpimarratzen dute [1]. Hortaz, adituen aburuz, benetako planeta-mailako **larrialdi** batean murgilduta gaude. Lur emankorren kudeaketa intentsiboak, industrien garapenak eta (mega)hirien hedapenak, tamalez, lurzoruen “osasuna” kaltetu dute, eta baita beraien “kalitatea” ere. Nahiz eta lurzoru-zientzietan oso eztabaidatuta dauden kontzeptuak izan, orokorrean, **lurzoruaren osasuna** “sistema bizidun moduan funtzionatzeko lurzoruak daukan gaitasuna” bezala definitzen da (ikuspuntu biologikoa). Lurzorua biozenosi anitz baten euskarria da, hain zuzen ere, ezagutzen diren espezie guztien laurdena lurzorian bizi da. Lurzorua euskarri duten sare-trofikoaren parte-hartzaileak lurzoruaren **funtzio naturalak** modu egokian aurrera eramateko ezinbestekoak dira, besteak beste, energia eta mantengaien birziklapenean (ziko biogeokimikoetan), uraren iragazpenean, eta kutsatzaileak indargetzen laguntzen baitute. Hala, Lurreko lurrazalaren biodibertsitatea funtsezkoa da etorkizuneko janari ekoizpena eta elikadura-segurtasuna bermatzeko [2]. **Lurzoruaren kalitatea**, aitzitik, “erabilera zehatz baterako duen egokitasunarekin edo emankortasunarekin” lotzen da (ikuspuntu antropozentrikoa). Osasuna ez bezala, kalitatea lurzoruaren **funtzio materialekin** erlazionatuta dago, hau da, eskaintzen dituen **zerbitzu ekologikoekin**, esaterako, lehengai berriztagarrien eta ez berriztagarrien hobia, etxebizitzaren eta azpiegituren kokalekua, eta oinordetza kulturalaren artxibategia izatearekin, besteak beste.

Baliabide edafikoen erabilera desantolatuak lurzoruaren **degradazioa** areagotu du. Funtsean, giza-jardueretan jatorria duten ekintza fisikoek (*adib.* higadura, zigilatzea eta trinkotzea) eta kimikoek (*adib.* azidotzea, gazitzea, materia organikoaren galera eta kutsatzaileen sarrera edafosferan) lurzoruen osasuna/kalitatea andeatu dute. Zentzu honetan,

ez dugu ahaztu behar **lurzorua giza eskalan berrizta ezin daitekeen baliabide estrategikoa** dela [3]. Mundu mailako mehatxu esanguratsuenetariko bat izateagatik, eta organismo bizidun guztien biziraupena (gizakiena barne) estatusunean jartzeagatik, orain hona dakargun lana lurzoruaren kutsadura ardatzen da. Europako Batasunean (EB) lurzoruaren kutsadura hegoaldeko zein iparraldeko herrialdeetan errotzen den arazo/“gaixotasun” ekologiko handienetakoa da. 2014an EBak plazaratutako lurzoruen inbentarioak egoera atsekabegarri bat jarri zuen agerian: Europa mailan 2,5 milioi gune inguru potentzialki kutsatuta daude eta, horietatik ia % 15ak (~0,35 milioik) kutsadura-maila altua du eta, ondorenez, errehabilitazio behar larria [4]. Kontsultatutako txostenaren arabera, meatzaritza, industria astunek zein nekazaritza-praktika erasotzaileek lurzoru kutsatuen arazoa areagotzen dute. Kutsatzaile ohikoenak metalak (*adib.* Zink-a –Zn–; kobrea –Cu–, beruna –Pb–, merkurioa –Hg– eta kadmioa –Cd–) eta metaloideak (*adib.* artsenikoa –As– eta selenioa –Se–), pestizidak (bereziki konposatu organiko aromatikoak, DDT bezalakoak) eta mineral-olioak (*adib.* hidrokarburo erregaiak) dira, hurrenez hurren. Bestalde, farmazia, biomedikuntza, elektronika eta materialen zientzietan emandako aurrerapenek, kutsatzaile berrien (*adib.* antibiotikoak, plastifikatzaileak eta nanomaterialak) sorrera eragin dute. Horretaz gain, aipatutako kutsatzaileak airean eta uretan erraz barreiatzen direnez, kutsadura kutsatzaile-iturritik urrun dauden lurzoruetara ere heda daiteke. Kutsadura difusioaren hedadura gutxiago ezagutzen den arren, ziurrenik milaka kilometro koadro lurzoru mehatxatuta leudeke [5]. Gainera, aipatutako kutsatzaile ezberdinak maiz agertzen dira lurzorian nahastuta, lurzoru kutsatuaren berreskurapenerako erronka berri bat gehituz.

“Desindustrializazioaren” eta meatzaritza- zein metalurgia-jardueren eraistearen ondorioz, abandonaturiko industria-lurzoruak (ingelesez, “brownfield” deiturikoak) ugarituz joan dira. Eremu horiek, ekonomiaren eta ingurumenaren arloan ez ezik, ondorio kaltegarriak izan ohi dituzte eskualdeko gizartearen ongizate eta bizi-kalitatean ere [6]. Gutxi gorabehera 7.200 Km<sup>2</sup>-ko azalerarekin eta 2 milioi biztanle baino zertxobait gehiagorekin, **Euskal Autonomia Erkidegoa (EAE) lurzoru abandonatu eta kutsatuen kasuistika anitzak dituen lurraldea da** [7]. Agidanez, EAE-ko industrializazioaren lehenengo hastapenetan izandako ingurumenarekiko kontzientzia-falta, urbanismo desantolatua, 1980tik aurrera emandako desindustrializazioa eta kontrolik gabeko hondakin-isurketak daude Erkidegoak jarauntsi dituen lurzoru abandonatu, kutsatu eta degradatuen zergatien artean. IHOBE-k (Eusko Jaurlaritzaren Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoak) maneiatzen dituen datuen arabera, iraganeko eta egungo jarduera-industrialek ondare gisa 12.331 lurzoru kutsatu utzi dituzte, 9.337 ha okupatzen dituztenak, hau da, Erkidegoaren azalera guztiaren % 1,1a eta jarduera ekonomikoek okupatzen dituzten lurraldearen % 67a [7].

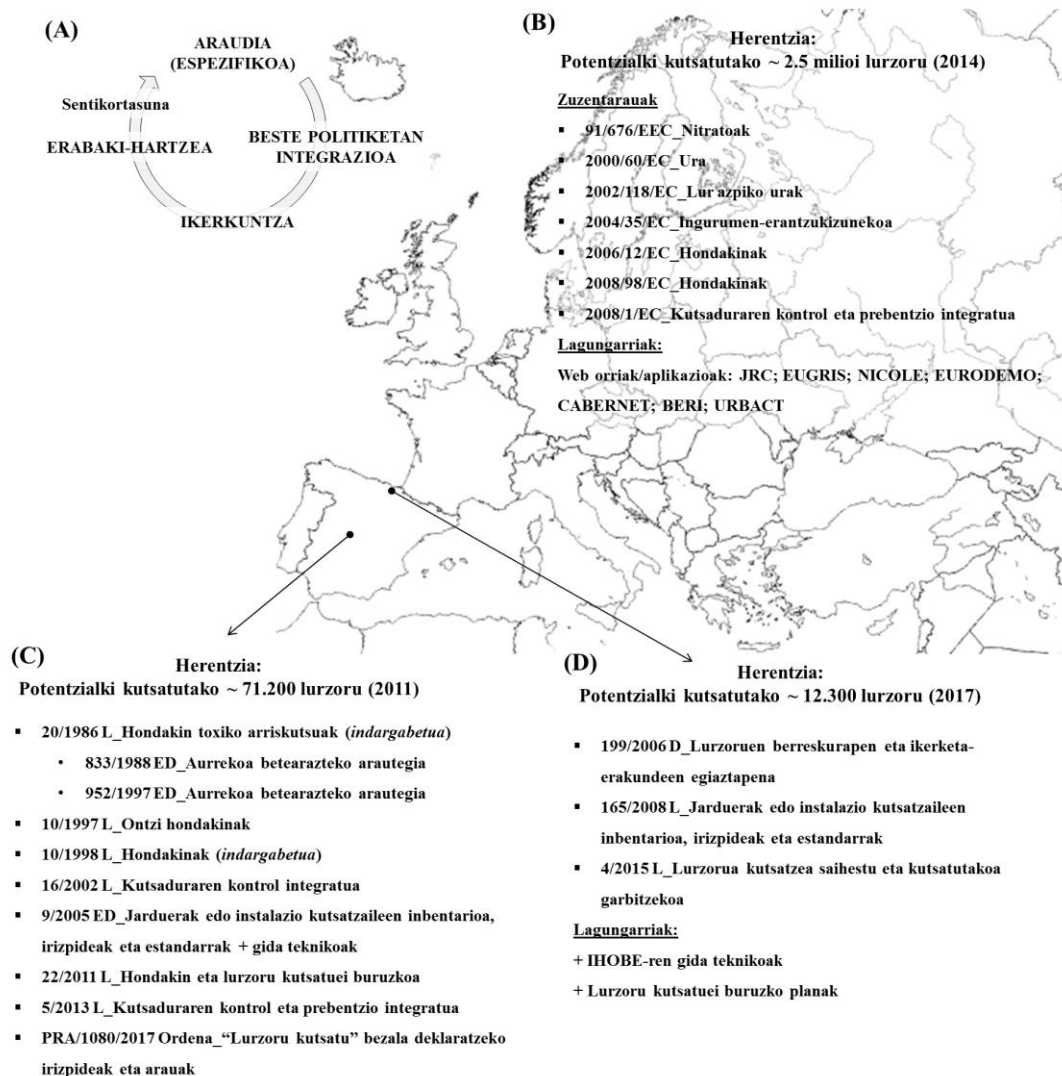
## 2. ERREFERENTZIAZKO LEGE MARKOAREN BERRIKUSKETA

**E**Bean airearen eta uraren kalitatea babesteko indarrean dauden lege-multzo espezifikoekin alderatuta, lurzoruen babeserako araudia atzerapen nabarmenarekin **garatzen ari da**. Izan ere, lurzoruaren kutsaduraren eboluzio motelak, ondorioak epe ertain-luzera azaleratzeak, eta kutsadurari aurre egiteak eskatzen duen diziplinarreko lankidetzak azaltzen dute, hein batean, aipatutako araudiaren atzerapenaren atzean. Hori horrela, Europako herrialde bakan batzuk lurzoruaren babeserako legedi espezifiko propioa daukate, horien artean Holanda, Alemania, eta Danimarka.

EBk dagoeneko lurzoruaren suntsipena “arazo larria” dela aitortu du. Hala eta guztiz ere, **2014an, Europako Parlamentuak lurzoruaren babeserako estrategia tematikoan (COM(2012) 46) landutako behin-behineko zuzentarauaren zirriborroa atzera** bota zuen, estatu desberdinek, besteen artean Alemaniak eta Erresuma Batuak, proposamena zortzi urtez blokeatuta mantendu ondoren. Aipatutako lurzoruen babeserako zuzentarauak EBean ikuspegi bateratua ezarriko luke eta, hari esker, gobernuek mehatxupear dauden eremuak identifikatu, lurzoruen egoerari buruzko datuak bildu eta elkarren artean partekatuko lituzkete. Halaber, zuzentzarau honek lurzoruekiko kalteak arintzeko programa nazionalak bultzatuko lituzke, nahiz eta herrialdeen eskuetan egon martxan jartzearen erabakia, eta baita haien diseinua ere. Gaur egun, beraz, lurzoruaren babes juridikoa **lehendik garatutako politiketan integratzen** da eta, momentuz, ez da autonomoki lantzen (ikus 1. Irudia). Horrela, lurzoruaren babesa bestelako zuzentzarauetan urardotuta dago.

Nahiz eta gobernu askok lurzoruaren kutsadura nazio mailako arazoa dela azpimarratu, azken urteotan, gutxi izan dira lurzoruak kutsaduratik babesteko xedearekin nazio edo/eta eskualdeko lege berriak onartu dituztenak (1. Irudia). Espainian, **1995.** urtean **Lurzoru Kutsaduraren Berreskurapenerako Plan Nazionala** onartu zen, eta beranduago Autonomi Erkidegoak (AE) ekintza plan desberdinak sustatuz joan dira. **10/1998 eta 3/1998 Legeek** [8], Estatu eta EAE mailakoak hurrenez hurren, lurzoru kutsatuaren kontzeptua Espainiako eta Euskadiko sistema juridikoan bitartekatu zuten. Lurzoru kutsatua “ezaugarri fisiko, kimiko edo biologiko guztiak modu negatiboan eraldatuak dituen lurzorua da, orokorki, giza-jatorria duten osagai arriskutsuen presentzia dela medio, giza-osasuna zein ingurumena arriskuan jartzen duten kontzentrazioetan, Gobernuak finkaturiko irizpide eta estandarren arabera” (10/1998 Legea, Art.3 p). Horrekin batera, aipatutako 10/1998 Legeak AEei lurzoru kutsatuak deklaratzeko, mugatzeko eta inbentariatuak izateko beharra ezarri zien. **Baina lurzorua baliabide bat da eta, beraz, ezin da hondakin moduan tratatu.** Lurzorua “babes objektu” den heinean, bere autonomia mantentzeko ezinbestekoa da berau baliabidetzat onartzea, airea eta urarekin egiten den bezala. Baliabide gisa, baliabide kutsatua izan daiteke, baina ez

hondakina. Honen adierarik nabarmena, **22/2011 Legeak**, hondakin eta lurzoru kutsatuei buruzkoak eta lurzoru kutsatuen erregimen juridikoa arautzen duenak, aurreko legea indargabetu eta bere V. Izenburuan lurzoru kutsatuen erregulazioa jorratzen du.



**1. Irudia.** Lurzoru kutsatuei buruzko arautegia bultzatzen duen motorea (A), ingurumen planak eta lagungarriak izan daitezkeen dokumentu teknikoak Europako Batasunean (B), Espainian (C) eta Euskal Autonomia Erkidegoan (D). D: Dekretua; ED: Errege Dekretua; L: Legea.

Lurzoruaren kalitatearen arloan partikularrek eta herri-administrazioek egin beharreko ekintzei legezko estaldura emateko jomugarekin, **9/2005 Errege Dekretua**, urtarrilaren 14koa, lurzoria kutsa dezaketen jarduerak zerrendatu eta lurzoru kutsatuak izendatzeko irizpideak eta estandarrak ezartzen dituena onartu zen. Jarraiki, Eusko Legebiltzarrak Lurzoria Ez Kutsatzeko eta Kutsatutakoa Garbitzeko 2005eko otsailaren 4ko **1/2005 Legea** onartu zuen. Biek, lurzoruari ondasun juridikoaren entitatea eman zioten, eta prebentzio eta kutsadura saihesteko zein arriskuak ebaluatzeko neurriak ezarri zituzten. EAEn hiru harroin ezarri ziren: bat, lurzorueta eraldaketa berriak agertzea saihestea; bi, kasurik premiazkoenak konpontzea;

eta, azkenik, kutsatutako lurzoru gisa oinordetzan hartutako pasiboa epe ertain eta luzera konpontzeko plangintza egitea. Era berean, 1/2005 Legeak lurzoru kutsatuaren definizioa osatu zuen: “gizakiaren ekintzen eraginez ezaugarri kimikoetan eraldaketaren bat duen lurzoru oro da, baldin eta aldaketa hori, ingurumenerako zein pertsonen osasunerako **ezin onartuzko arriskua duelako**, bere **funtzioekin bateraezina bada**, bai egungo erabilerarako bai erabilera aldatuz gero hurrengo baterako”. Galdera da, zer ulertzen da “arrisku onartezin”-tzat? Arriskuaren balioespen objektiboa bilatzeko eta administrazioen eskumena kontrolatzeko asmoz, ordenantza gehienek erreferentziazko balioen edo irizpideen zehaztapenera jotzen dute; horiek gaindituta, lurzorua kutsatuta egoteko aukera egon ez ezik, giza osasunarentzat edo ingurumenarentzako arrisku onartezina egon daiteke [9]. Hala bada, arriskuen ebaluazioa ezinbesteko tresna da, onartezintasuna baieztatzeko edo errefusatzeko. Geroago, **26/2007 Legeak**, urriaren 23koak, ingurumen erantzukizunari buruzkoak, “kutsatzaile-motak”, “kaltea” eta “arriskua” bezalako kontzeptuak zehaztu zituen. 2015ean, Eusko Legebiltzarrak lurzoruaren kutsadura saihestu eta kutsatutakoa garbitzeko ekainaren 25eko **4/2015 Legea** onartu zuen, berreskurapenerako alternatiba desberdinak aztertzeko betebeharra adierazten duena, eta lurzoru kutsatuen berrerabilpenerako interesgarriak izan daitezkeen alderdi teknikoak, ekonomikoak zein ingurumenekoak ere integratzen dituena. Berritasun gisa, eta Garapen iraunkorrerako 2002-2020 arteko EAEko ingurumen-estrategiaren barruan, “Lurzorua Babesteko 2020rako Estrategiaren” lehenengo idazkiak mahai gainean omen daude. EAEko lurzoru kutsatuei buruzko 2007-2012 arteko Planaren printzipioak abiapuntu moduan edukita, estrategia berri honek, antza denez, lurzoruaren erabilpen eraginkorraren inguruko kontzeptuak bereganatuko ditu (Europako bide-orria COM(2011)571). Itxuraz ere, eraikitzen ari den estrategia honetan enfasi berezia jarriko omen da lurzoruaren “degradazio garbia zero” izatean, Garapen Iraunkorrari buruzko Nazio Batuen Batzarrean (Rio+20) mahaigaineratutako helburu-sorten artean dagoena.

Lurzoruaren babeserako garapen bidean dauden arazko eskakizunek berreskurapen/erremediazio proiektuei lurzoruaren osasun/kalitatearen inguruko **ikuspegi holistikoa** eskatzen diete. Ikuspegi horren arabera, ez da soilik kutsatzaileen kontzentrazioa kontuan hartzen, baizik eta lurzoruaren bestelako ezaugarri kimiko, fisiko, eta biologiko batzuk ere, hauen arteko elkarrenergina funtsezkoa baita lurzoruaren funtzionamendu egokirako [10].

### 3. LURZORU KUTSATUEN KUDEAKETA PROZESUA

Lurzoruen kutsadurak duen garrantzia ikusarazteko, arazoaren inpaktu ekonomikoari erreparatu behar diogu. Europako Ingurumen Agentziaren (EIA) arabera, batz bestez, **lurzoru kutsatuen kudeaketaren gastu osoaren (~6.5 biloi euro urtero) % 42a**

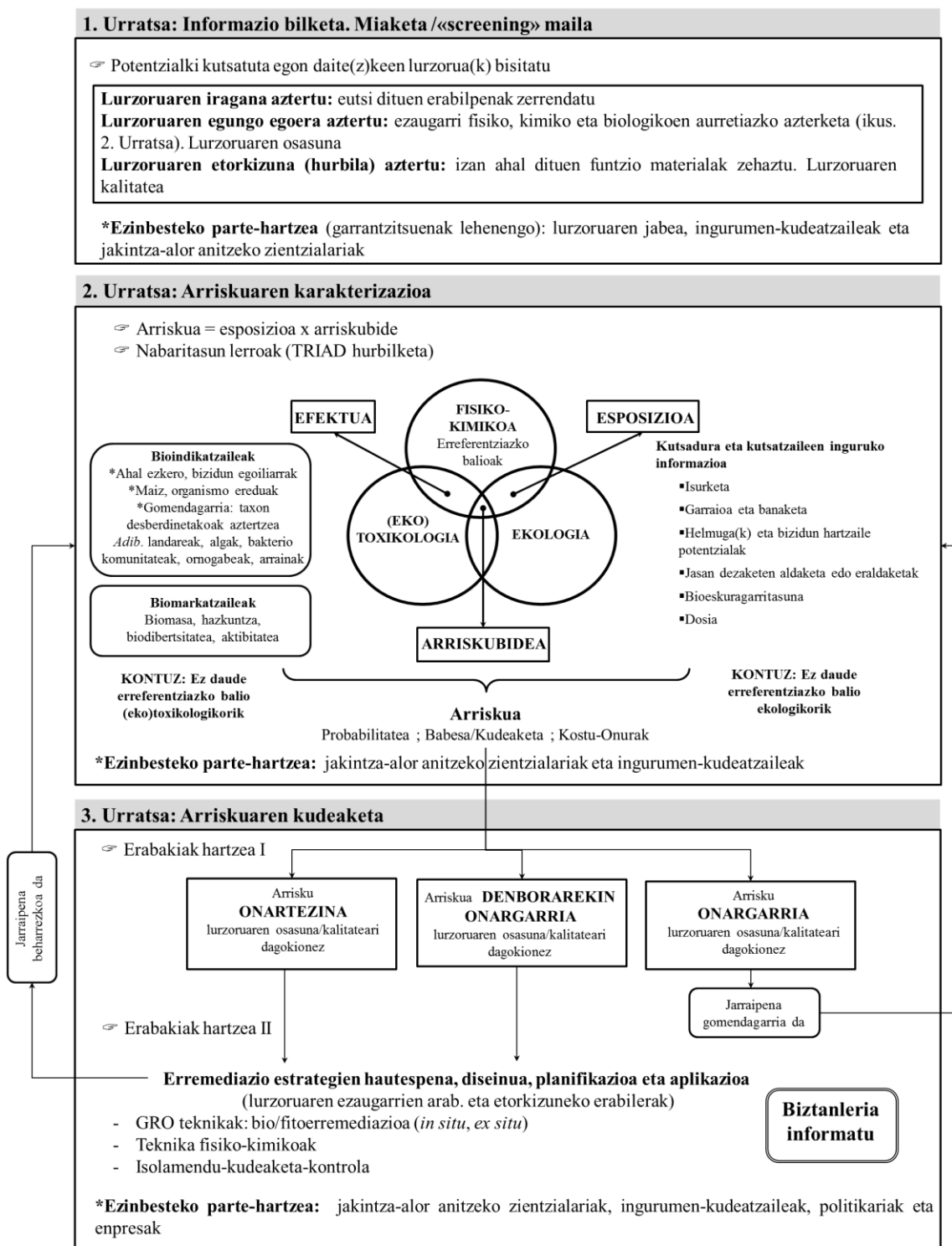
**aurrekontu publikoetatik eratorria da.** Urtero kutsatutako lurzoruak kudeatzeko gastu nazionala, batez beste, 10,7 € *per capita* ingurukoa da, Barne-Produktu Gordinaren ~% 0,04 batezbestekoarekin bat datorrena. Nahiz eta gastu nazionalen % 81 erremediazio-neurrietara zuzenduta egon, ikerkuntzarako bakarrik % 15a inbertitzen da [4]. Honakoak dira kontuan hartzeko moduko beste datu batzuk: lurzoru kutsatu potentzialen ikerketa kostuak, oro har, 5.000 - 50.000 € bitartekoak dira eta erremediazio-proiektuen kostuak 50.000 - 500.000 € bitartekoak [4;11]. Erremediazio prozesuaren fase desberdinetan zehar **interesatuen parte-hartzea aurre-betekizun inportantea da** erabakia hartzearen prozesua hobetzeko [6]. Interesatuak (“stakeholder”-ak), lurzoruen jabeak, planifikatzaileak, aholkulariak, erregulatzaileak, tokiko komunitateak, inbertitzaileak eta aseguruak izan daitezke.

Lurzoruen kudeaketak ondoz ondoko bost eustazpi eduki beharko lituzke: (i) prebentzioa; (ii) lurzoruaren karakterizazioa; (iii) arriskuen karakterizazioa, ebaluaketa eta erabaki-hartzea; (iv) erremediaziorako estrategiaren hautespena, diseinua, inplementazioa eta jarraipena eta, azkenik; (v) aurrera eramandako kudeaketaren emaitzen bilketa eta transferentzia. Hirugarren eustazpi horren muinean **Arriskuen Ingurumen-Ebaluazioa (AIE) (ingelesez, “Environmental Risk Assessment –ERA–”)** kokatzen da, ekosistemen kutsadurak ekartzen dituen arriskuak kalkulatzeko ingurumeneko datuak biltzen, antolatzen eta aztertzen dituen prozesua [12]. Hala ere, lurzoru kutsatuen ingurumen-arriskuak ebaluatzea zailtasunez josita dago. Lurzoruen izaera heterogeneoa dela eta, sarritan, lurzoruaren kutsadura ez da uniforme eta, ondorioz, zehazteko zailagoa izan ohi da. Edozein arriskuen ebaluazioan, baita AIEn ere, aztertu beharreko oinarrizko faktoreak hurrengo ekuazioan laburbildu daitezke: “arriskua = esposizioa x arriskubide edo inpaktua (x kalteberatasuna)” (ikus 2. Irudia). Sarritan, AIE, segidako fase edo mailatan hierarkizatuta dago. Orokorrean, aurretiazko karakterizazio batekin hasi eta arriskuaren karakterizazio, komunikazio eta kudeaketarekin jarraitzen du. Azken maila honetan, eta lurzoruari eman nahi zaion erabileraren arabera, garatu daitezkeen estrategien inguruko erabakiak hartzen dira, tartean bio/fitoerremediazioa (2. Irudia).

Zabalki onartuta dago ez dela posiblea lurzoruaren kutsatzaileen inpaktua ebaluatzea haien kontzentrazioa bakarrik neurtuz, honek **“kutsadurari”** buruzko informazioa soilik ematen baitu, eta ez **“poluzioari”** buruzkorik [13]. Zentzu honetan, “kutsadura” substantzia baten presentzia egon behar ez deneko lekuan edo eremu horretarako jatorrizko maila naturala gaingiditzen duen kontzentrazioan topatzeari deritzo. “Poluzioa”, berriz, organismo egoiliarrengan kontrako eragin biologikoak sortzen dituen kutsadura bezala definitu daiteke. Horregatik ez da arraroa AIEn nabaritasun lerro kimikoaz (kontzentrazio totala) gain, toxikologikoa eta ekologikoa ere jorratzea (TRIAD hurbilketa) (2. Irudia) [13].

Kutsatzaileek eragindako kontrako efektu biologikoak aztertzeko edo, beste era batera esanda, horiek lurzoruaren osasunean izan ditzaketen inpaktuak analizatzeko, erreminta biologikoak (bioindikatzailak eta biomarkatzailak) erabiltzen dira. Adierazle hauek indikatzaile kimikoekin alderatuta, azkarragoak, sentikorragoak, zehatzagoak, integratzaileagoak eta kostu-efektiboagoak direla frogatu da [14]. **Bioindikatzailak** (organismo edo komunitate bizidunek) **eta/edo biomarkatzailak** (bizidunean ematen diren aldaketa molekular, biokimiko, fisiologiko edo morfologiko neurgarriek) emandako erantzunak tradizionalki kutsatzaileen kontzentrazio total eta bioeskuragarriekin konparatzen dira, "kausa-eragin" harremanak ezartzeko asmoz (kausa: kutsatzaileen kontzentrazioa; efektua: erantzun biologikoa) [13]. Hala ere, erantzun biologikoak Kimikaren argitan baino Biologiaren argitan interpretatzearen premia ikusi da. Hari beretik, kutsatutako edo berreskuratutako lurzoruentzat, datu biologikoetatik abiatuz arauzko mugak ezartzearen aukera kontutan hartu beharko litzateke. Epelde et al.-en arabera [15], fitoerremediazio-estrategien eraginkortasuna **kutsatzaileen alderditik zein ekosistemen zerbitzuen hornikuntzaren alorretik** (h.d. karbono-bahiketa, lehengaien ekoizpena, higaduraren kontrola, balio estetikoa) ebaluatu beharko litzateke. Lurzoruaren ezaugarriak, hala nola, lurzoruko ezaugarri mikrobiologikoak, ekosistemen zerbitzuetan edo atributu ekologikoetan (*adib.* indarra, antolaketa, egonkortasuna, gaitzen aurreko supresibitatea, erreduantzia) sailkatu daitezke. Ikuspegi hau lagungarria izan daiteke epe luzeko jarraipen programetan, goimailako kategoria horiek, metodoen edo interesen aldaketen gainetik, denboran zehar egonkortasuna ematen dutelako.





2. Irudia. Lurzoru kutsatuen Arriskuaren Ingurumen-Ebaluazioaren (AIE) eskema orokorra.

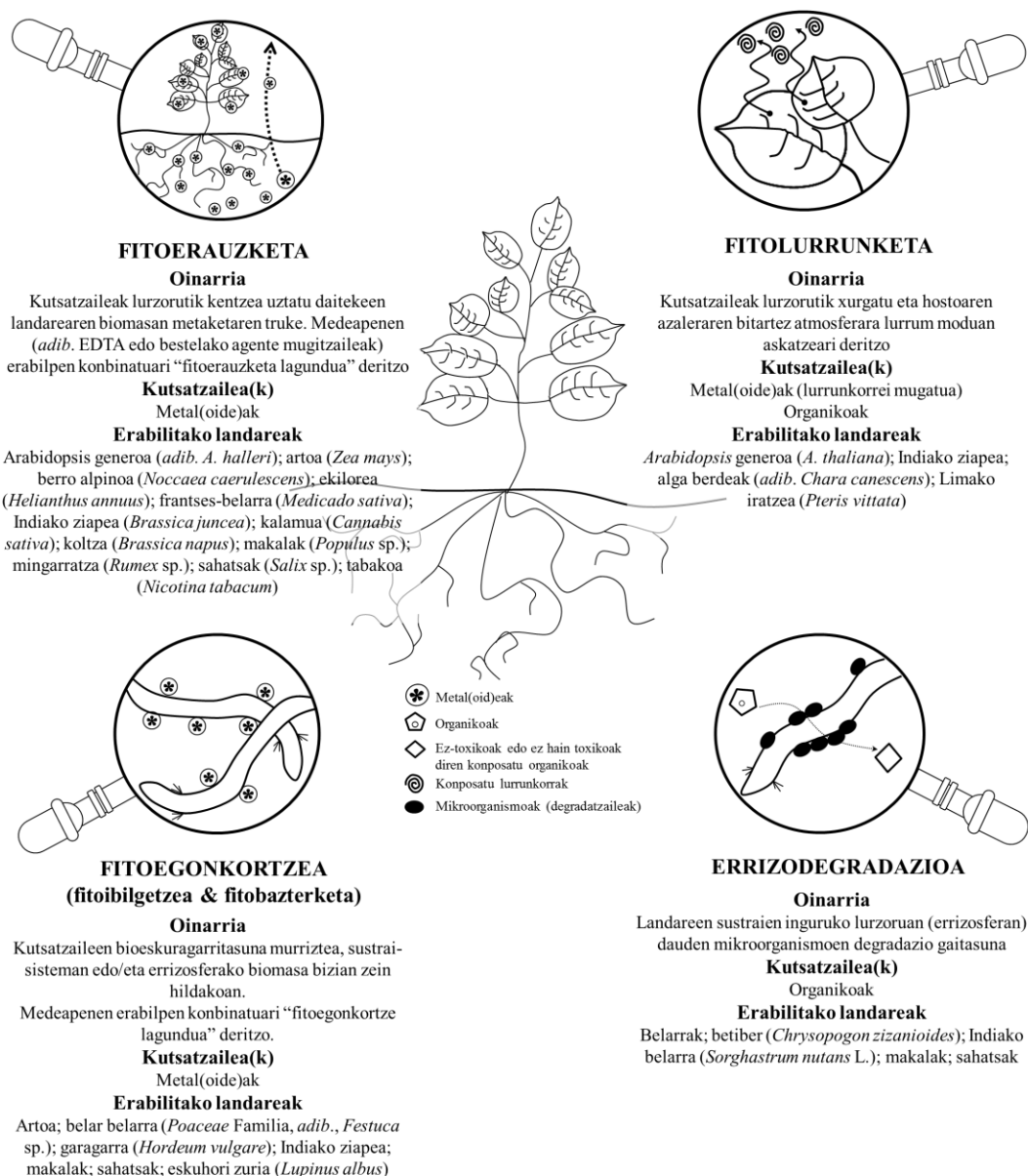
#### 4. LURZORU KUTSATUEN BERRESKURAPEN BIOLOGIKOA HELBURU

Inplikazio ekonomikoak eta teknikoak direla eta, lurzoruen berreskurapena zailtasunez beteta dago. Ingeniaritza zibilaren ohiko teknika fisiko-kimikoak bazter utzi, zeintzuek lurzoruaren egiturari, konposizio kimikoan eta biozenosian atzerazinak diren eraldaketak sorrarazten dituzten (*adib.* garbiketa, indusketa eta errausketa), eta sargai baxuko erremediazio aukera bigunen erabilera lehenetsi beharko litzateke (*adib.* bioerremediazioa eta fitoerremediazioa) [5]. **Erremediaziorako aukera bigunak (ingelesez, “Gentle Remediation Options”, GRO)** lurzoru kutsatuen arriskuen kudeaketarako estrategiak edo teknikak dira, lurzoruen funtzionaltasun ekologikoan murrizketa gordinak sorrarazten ez dituztenak [16]. Hemendik aurrera GRO erabiliko dugu teknika hauei erreferentzia egiteko. Beraz, erremediazio aukera hauek lurzoruak “osasuntsu” eta “biologikoki emankorrak” mantentzeko erabilgarritasun berezia daukate. Era egoki batean aplikatuta, GRO hauek hurrengo abantailak eskaintzen dituzte: (a) arriskuen kudeaketa azkarra puntu kritikoak (iturria(k)-bidea(k)-hartzailea(k)) kontrolatuz; eta (b) bestelako onura ekonomikoak (*adib.* biomasa sortzea), sozialak (*adib.* balio hezigarria eta aisialdirako) baita onura ekologikoak ere (*adib.* CO<sub>2</sub> atxikipena) [ikusi 5 eta bertako erreferentziak; 16]. Kapital-kostuak erlatiboki txikiak izatea eta landatutako guneei datzekion estetika bera ere GROen abantailen artean daude [16;17].

Erremediaziorako aukera bigunek bioerremediazioa eta fitoerremediazioa bezalako bioteknologiak barne hartzen dituzte. Izatez, **bioerremediazioa** mikroorganismoek bideratutako berreskuratze-prozesua da. **Fitoerremediazioan**, ordea, landareak eta beraiei loturiko mikroorganismoak dira teknologiaren ardatz nagusiak. Onura ekonomikoan oinarrituta, fitoerremediazioan, teknika desberdinak egon arren (3. Irudia), funtsean, hiru estrategia nagusi bereizi daitezke: (i) metalen erauzketan oinarritutako onura ekonomikoa (fitoerauzketa); (ii) arriskuaren minimizazioa (fitoegonkortzea); eta (iii) lurzoruaren kudeaketa iraunkorra (fitokudeaketa), zeinean fitoerremediazioak etengabe areagotzen duen lurzoruaren emankortasuna, hurrengo hazkuntza-zikloetan balio ekonomiko erantsia duten laborantzak baimenduz. Horietaz gain, biomasa handiko eta hazkunde azkarreko landareak, zuhaitzak kasu, energia-ekoizpena eta fitoerremediazioa aldi berean lortzearen xede bikoitzarekin ere ustiatzen dira.

Hainbat ikerketek GROen potentziala nabarmendu dute, fitoerremediazio-teknikena batez ere, kutsatzaileak lurzurutik erauzteko edo bertan egonkortzeko/ibilgetzeko [5]. Edozein **fitoerremediazio-teknologiaren arrakasta** ondorengo oinarritzko hiru faktoreen elkarrekintzaren araberakoa da: (i) landare espeziearen izaera (ii) lurzoru mikroorganismoen komunitatea (iii) eta kutsatzaileen ezaugarri fisiko-kimikoak. Lan honen

lehenengo atalean aipatu den bezala, gainera, lurzoru kutsatu gehienak kutsatzaile organiko eta ez-organikoekin aldi berean kutsatuta egoteak zailtasunez betetzen du fitoteknologiaren diseinua, kutsatzaile-mota bakoitzak lurzoruan jokaera eta ezaugarri fisiko-kimiko desberdinak dituelako [18]. Puntu honetan, garrantzitsua da azpimarratzea edozein **bio/fitoerremediazio-prozesuen azkeneko helburua** ez dela bakarrik lurzoruan dagoen kutsatzailearen kontzentrazioa murriztea araudiak finkatutako erreferentziatzko balioetaraino, baizik eta **ekosistema edafikoaren osasuna berreskuratzea** [19].



**3. Irudia.** Fitoerremediazio tekniken oinarriak eta erabilitako landare-espezieak. Irudiaren iturria: [14]. Informazio gehiagorako, ikusi [5]; [20] eta [21] artikulua eta barneko erreferentziak.

Aipatutako erremediazio-bioteknologiak entzutetsu egiten ari dira ingurumenaren kudeaketa iraunkorraren alorrean, bereziki baliotsuak izanik bioekonomiaren esparruan. Azkeneko hamar urte hauetan, **bioekonomiaren** paradigma geroz eta erakargarriago bihurtu da politika-arduradunentzat. Ikuspuntu praktiko batetik, bioekonomia baliabide biologikoen ezagutzan oinarritzen da, zeintzuei zientzia eta teknologia aplikatzen zaizkien jakintza, ondasunak eta zerbitzuak lortzeko asmoz [22;23]. Gure kasurako, esaterako, bio/fitoerremediazio teknologien bitartez osasuna/emankortasuna berreskuratzen duten lurzoru kutsatuak aktibo sozial eta ekonomiko baliotsu bilakatzen dira. Garapen iraunkorretik aldendu gabe eta gizarte-errentagarritasuna aintzakotzat hartuta, lurzoru hauek aisialdirako, elikagaien ekoizpenerako, edo eta berurbanizaziorako eremu berde berri (“greenfield”) bihurtu daitezke, nahiz eta onartu behar den, momentuz, onura horien ustiaketa ziurgabetasunez beteta dagoela.

## **5. LURZORUEN FITOERREMEDIAZIOA ETA FITOKUDEAKETAREN ADIBIDEAK: “GREENLAND” ETA “PhytoSUDOE” PROIEKTUAK.**

Gaurko joerak aintzat hartuta, etorkizunerako iragarpena ez da oso itxaropentsua: badirudi 2025. urterako lurzoru kutsatuen kopurua bikoiztu egingo dela [24]. Izan ere, arazoaren dimentsioak identifikatu gabe dirau. Bitartean, erremediazio-programek (prozedura biologikoetan zein fisiko-kimikoetan –*adib.* hondeaketan eta zabortegetan biltegitratzean– oinarritutakoak) astiro darraite aurrera. Azken hamarkadetan, soilik ~51.000 gune inguru besterik ez dira kudeatu (potenzialki kutsatutakoen % 15a) [4]. Hori dela eta, egungo erremediazio-jardueren maila aintzat hartuz, lurzoru kutsatuen arazoa gutxituz baino, hazten doa.

Erremediaziorako aukera bigunek onurak izan arren (ikus 4. Azpiatala), haien *in situ* aplikazioa oso mugatua da oraindik ere, bereziki, Europan eta metal(oid)eeekin kutsatutako lurzoruetan [25;26]. GRO tekniken aplikazio orokorrerako oztopo nagusiak erremediazio-sektorearen hurbilketa orokorretik eratortzen dira, bereziki, erremediazioaren arrisku kritikoetatik edo industria-guneei erabilera produktiboa azkarregi itzuli beharregatik [16]. Azterketa pilotu konbentzigarrien gabezia eta araudi-esparru sendo baten falta ere oztopo nabarmenak dira [16;25]. Beharbada, agintari politikariek eta interesatuek GRO tekniken inguruan duten ezjakintasuna eta konfiantza-falta lirakeke hauen aplikazio baxuaren arrazoia. Batik bat, GROen erabilgarritasun mugatua hurrengo eragozpen hautemangarriei (edo errealei) zor zaie: (a) GROek behar duten denbora-eskalaren eta arriskuen kudeaketarako duten epe luzerako eraginkortasunaren inguruko ziurgabetasuna; (b) tekniken aplikazioaren eskaintza aholkulari eta kontratista gutxi batzuei mugatuta egotea, gutxienez Europan; eta,

azkenik, (c) teknika hauek *in situ* aplikatu daitezkeen irtenbide praktiko gisa kontutan ez hartzea [5;16].

Oztopo hauek gainditu nahian, EBk finantzaturako **GREENLAND** (“**Gentle Remediation of Trace Element Contaminated Land**”) proiektuak (2010-2015) [27] lurzoruko kutsatuen kudeaketarako GRO teknikak erabiltzearen aldeko apustua egin zuen. Are gehiago, landa-ikerketak, ebaluazio eta erabakiak hartzeko tresna eta praktika onen gida garatzeko erronkei heldu zien. Praktika onen gida honek **fitoerremediazioetik fitokudeaketarako aplikazio-ikuspuntua goratu** nahi izan du. Fitokudeaketan kutsatzaileak erauzi edo egonkortzeko gaitasuna duten eta aldi berean elikapenerako ez diren baina bestelako balioa (*adib.* energetikoa) izan dezaketen laborantzak erabiltzen dira. Horrela, fitokudeaketan lurzoruko berreskuratzeko ekarriko lituzkeen onurak (ekonomikoak barne) fitoerremediazio-estrategiaren diseinuaren erdigunean kokatzen dira. Hala, GROak abandonaturako eta kutsaturako lurzoruen arriskuen kudeaketa eta berreskurapenerako konponbide integralen artean kokatu edo eta, bederen, eremu horien “mantentze-estrategia” bezala erabil daitezke [5]. “Mantentze-estrategia”-rekin kutsatzaileen mugikortasuna, lixibiazioa, garraioa, bioeskuragarritasuna eta lurrunketa gutxitzea, lurzoru abandonatuen eta kutsatuen arriskua murriztea, biomasaren ekoizpena, zerbitzuak eta aisialdirako guneak sortzea, ingurumenaren hobekuntza, hiriko klimaren kudeaketa, ekosistemen zerbitzuak ematea, besteren artean, adierazi nahi da [5].

Aurretik azaldu diren kontzeptuak oinarri harturik, **PhytoSUDOE proiektuak** (Interreg Sudoe deialdia, 2015-2018) [28] kudeatzaile eta lurzoru kutsatuen jabeen aldetik fitokudeaketa-tekniken erabilpen zabalagoa bultzatzen du. Proiektuaren helburu nagusia, eta EBko lurzoruen erremediazio eta babesarekin lotutako helburuekin kontsonantzian, ingurune degradatuak (fito)kudeatzea eta erremediatzea da, biodibertsitatea sustatzen duten fitoerremediazio teknika berriak aplikatuz, ekosistemen funtzionaltasun integrala (osasuna) hobetzeko eta baliabideen erabilera (kalitatea) iraunkorra ahalbidetzeko. PhytoSUDOE proiektuan fitokudeaketarako labore zein zuhaitzetan oinarritutako fitoerremediazio-teknikak, lurzoru-zuzenketak eta bakterio endofito eta errizosferikoen inokulazioak erabiltzen dira.

Orain arte deskribatu ditugun fitoerremediazio-tekniken aplikazioaren ahuleziak gainditzeko ezaugarriak ditu PhytoSUDOE proiektuak. Hasteko, Portugal, Espainia eta Frantzia arteko 10 bazkidez eta alor desberdinetako espezialistez (lurzoruaren geologia eta biologiatik, agronomia, paisaiaren plangintza eta arriskuen ebaluaketara) osatutako lantaldea izateak fitokudeaketaren diseinuari eta emaitzen interpretazioari sendotasuna eta ikuspegi holistikoa ematen dizkiote. Bigarrenik, aipaturako herrialdeen arteko 11 kokaleku kutsatu edo degradatuz osatutako esperimentu-sarearen ezarpenak eta jarraipenak, fitokudeaketak

lurzoruen erremediazio ekologikorako duen potentzialaren ebidentzia konbentzigarriak lortzea baimenduko du. Kokaleku horietako bi EAEn daude, konkretuki Jundizko Industrialdean (Gasteizko mendebaldean). Proiektuaren azken indargunea, baina ez horregatik garrantzi gutxiagokoa, dibulgaziozko jardunaldien bitartez, interesatuen lurzoru degradatu/kutsatuekiko sentikortasuna eta fitokudeaketaren ontasunen inguruko ezagutza areagotzean datza.

## 6. ONDORIOAK

Horrenbestez, eta laburpen gisa, lurzoru kutsatuen kudeaketaren inguruan hurrengoak dira gure ustez garatu beharreko gaiak (lehenengoak premiazkoenak):

- Lurzoruen kutsadurari **aurre hartzeko** asmoz, honen inguruan interesatuek (batik bat, politikariek, kudeatzaileak eta gizarteak) duten informazioa sakondu eta sentikortasuna bultzatzea.
- Kutsadurari atxikitutako arriskuen **karakterizazioan** (esposizioaren eta inpaktuaren ebaluazioan) eta (bio/fito)erremediazio prozesuaren jarraipenean bioindikatzaileretatik eratorritako informazio integratzaileari garrantzia gehiago ematea.
- Lurzoru kutsatuen **erremediazioari** dagokionez, GROen onura anitzei balio erreala ematea eta haien erabilera bultzatzeko ekimenak garatzeko laguntza tekniko, sozial eta ekonomikoen sustatzea, udalerrri, Erkidego, Estatu eta Europa mailan.
- Fitoerremediazioa lurzoruak onbideratzeko ohiko teknologia bilaka dadin, **epe luzeko landa-ikerketeki lehenetasuna** ematea. Gainera, prozesua arrakastatsua izateko landare eta lurzoruko mikroorganismoen arteko erlazioak ondo ezagutzea (bai maila molekularrean zein fisiologikoan) erabakigarria da. Honetarako, zalantzarik gabe, jakintza-alor anitzeko hurbilketa bultzatzea beharrezkoa izango da.
- Lurzoru kutsatuen edo degradatuen (*adib.* metropoli-eraztunen ingurukoak) berreskurapen eta berrerabilpen eraginkorrek epe laburrean dakartzaten berealdiko **onura ekonomiko, sozial eta ekologikoak kuantifikatzea**, jakinik hurrengo belaunaldietan ere berreskuratutako lurzoru hauetatik eratorritako onurak mantenduko direla.
- Lurzoru kutsatuen babesa eta kudeaketa (espezifikoki) arautzen dituzten **legeen eta gida teknikoaren aplikazioaren sustatzea**.

## ESKER ONAK

Eskerrak eman Eusko Jaurlaritzari (Ikerketa Talde Kontsolidatuak, GIC15/44-IT-018-16), Espainiar Ekonomia eta Lehiakortasun Ministeritzari (NANORRIZOREM, AGL2015-64481-C2-1-R) eta FEDER Europako fondoaren programari (PhytoSUDOE, SOE1/P5/E0189)

emandako proiektuengatik. Bestalde, MT.G-S-k eskerrak eman nahi dizkio Euskal Herriko Unibertsitateari (UPV/EHU) doktoretza-ondoko diru-laguntzagatik.

## 7. BIBLIOGRAFIA

[1] WORLD WILDLIFE FUND WWF. 2016. Living Planet Report.

[2] FAO – Food and Agriculture Organization of United Nations. 2015a. «Healthy soils are the basis for healthy food production » informazio-orria.

[3] FAO – Food and Agriculture Organization of United Nations. 2015b. «Soil is a non-renewable resource. Its preservation is essential for food security and our sustainable future » informazio-orria.

[4] VAN LIEDEKERKE, M., PROKOP, G., RABL-BERGER, S., KIBBLEWHITE, M., eta LOUWAGIE, G. 2014. *Progress in management of Contaminated Sites in Europe*. EUR 26376, Publications Office of The European Union, Luxenburgo.

[5] CUNDY, A. B., BARDOS, R. P., PUSCHENREITER, M., MENCH, M., BERT, V., FRIESL-HANL, W., MÜLLER, I., LI, X.N., WEYENS, N., WITTERS, N., eta VANGRONSVELD, J. 2016. «Brownfields to green fields: realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies ». *Journal of Environmental Management*, **184**, 67 – 77.

[6] RIZZO, E., PESCE, M., PIZZOL, L., ALEXANDRESCU, F. M., GIUBILATO, E., CRITTO, A., MARCOMINIA, A., eta BARTKE, S. 2015. «Brownfield regeneration in Europe: Identifying stakeholder perceptions, concerns, attitudes and information needs ». *Land Use Policy*, **48**, 437 – 453.

[7] IHOBE – Eusko Jaurlaritzako Ingurumen eta Lurralde Politika Sailaren Ingurumen-Jarduketarako Sozietate Publikoa. 2017a. «Making a virtue of necessity - the case of a small region: the Basque Country ». *European achievements in soil remediation and brownfield redevelopment. A report of the European Information and Observation Network's National Reference Centres for Soil (Eionet NRC Soil)*. Payá Pérez A., A. eta Peláez Sánchez, S. (Edk). Europako Batasuna. doi:10.2760/818120

[8] <http://www.euskadi.eus/eusko-jaurlaritza/ingurumen-lurralde-politika-saila/hasiera/Eguneratze-data>: 2018/04/26.

[9] IHOBE – Eusko Jaurlaritzako Ingurumen eta Lurralde Politika Sailaren Ingurumen-Jarduketarako Sozietate Publikoa. 1998. *Investigación de la contaminación del suelo: Valores indicativos de evaluación (VIE-A, VIE-B, VIE-C)*. Ingurumen, Lurralde Plangintza eta Etxebizitza Saila, Eusko Jaurlaritz. Vitoria-Gasteiz.

[10] VOLCHKO, Y., NORRMAN, J., ROSÉN, L., BERGKNUT, M., JOSEFSSON, S., SÖDERQVIST, T., NORBERG, T., WIBERG, K., eta TYSKLIND, M. 2014. «Using soil function evaluation in multi-criteria decision analysis for sustainability appraisal of remediation alternatives ». *Science of the Total Environment*, **485**, 785 – 791.

[11] PANAGOS, P., VAN LIEDEKERKE, M., YIGINI, Y., eta MONTANARELLA, L. 2013. «Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network ». *Journal of Environmental and Public Health*, .doi.org/10.1155/2013/158764.

[12] JENSEN, J., MESMAN, M. 2006. «Ecological risk assessment of contaminated land-Decision support for site specific investigations ». RIVM National Institute for Public Health and the Environment, Centre for Environmental Quality, txosten zenbakia 711701047. Bilthoven, Herbehereak.

[13] GÓMEZ-SAGASTI, M. T., EPELDE, L., ALKORTA, I., eta GARBISU, C. 2016. «Reflections on soil contamination research from a biologists point of view ». *Applied Soil Ecology*, **105**, 207 – 210.

[14] GÓMEZ-SAGASTI, M. T., ALKORTA, I., BECERRIL, J. M., EPELDE, L., ANZA, M., eta GARBISU, C. 2012. «Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation ». *Water, Air, and Soil Pollution*, **223**, 3249 – 3262.

[15] EPELDE, L., BECERRIL, J. M., ALKORTA, I., eta GARBISU, C. 2014. «Adaptive Long-Term Monitoring of Soil Health in Metal Phytostabilization: Ecological Attributes and Ecosystem Services Based on Soil Microbial Parametersxs ». *International Journal of Phytoremediation*, **16**, 971 – 981.

[16] CUNDY, A. B., BARDOS, R. P., CHURCH, A., PUSCHENREITER, M., FRIESL-HANL, W., MÜLLER, I., NEU, S., MENCH, M., WITTERS, N. eta VANGRONSVELD, J. 2013. «Developing principles of sustainability and stakeholder engagement for “gentle” remediation approaches: The European context ». *Journal of Environmental Management*, **129**, 283 – 291.



[17] ITRC – Interstate Technology Regulatory Council. 2009. «Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised ». Washington DC, Ameriketako Estatu Batuak (AEB).

[18] TRIPATHI, V., FRACETO, L. F., eta ABHILASH, P. C. 2015. «Sustainable clean-up technologies for soils contaminated with multiple pollutants: plant-microbe-pollutant and climate nexus ». *Ecological Engineering*, **82**, 330 – 335.

[19] HERNÁNDEZ-ALLICA, J., BECERRIL, J. M., ZARATE, O., eta GARBISU, C. 2006. «Assessment of the efficiency of a metal phytoextraction process with biological indicators of soil health ». *Plant and Soil*, **281**, 147 – 158.

[20] KHANNA, P.S. 2011. «Assessment of heavy metal contamination in different vegetables grown in and around urban areas ». *Research Journal of Environmental Toxicology*, **5**, 162.

[21] KHALID, S., SHAHID, M., NIAZI, N. K., MURTAZA, B., BIBI, I., eta DUMAT, C. 2017. «A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils ». *Journal of Geochemical Exploration*, **182**, 247 – 268.

[22] OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009. *The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda*. Paris, Frantzia.

[23] LOISEAU, E., SAIKKU, L., ANTIKAINEN, R., DROSTE, N., HANSJÜRGENS, B., PITKÄNEN, K., LESKINEN, P., KUIKMAN, P., eta THOMSEN, M. 2016. «Green economy and related concepts: An overview ». *Journal of Cleaner Production*, **139**, 361 – 371.

[24] GILLESPIE, I. M., eta PHILP, J. C. 2013. «Bioremediation, an environmental remediation technology for the bioeconomy ». *Trends in Biotechnology*, **31**, 329 – 332.

[25] VANGRONSVELD, J., HERZIG, R., WEYENS, N., BOULET, J., ADRIAENSEN, K., RUTTENS, A., THEWYS, T., VASSILEV, A., MEERS, E., NEHNEVAJOVA, E., VAN DER LELIE, D., eta MENCH, M. 2009. «Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field ». *Environmental Science and Pollution Research*, **16**, 765 – 794.

[26] MENCH, M., LEPP, N., BERT, V., SCHWITZGUEBEL, J.P., GAWRONSKI, S.W., SCHROEDER, P., eta VANGRONSVELD, J. 2010. «Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859 ». *The International Journal of Soil, Sediment and Water*, **10**, 1039 – 1070.

[27] [www.greenland-project.eu](http://www.greenland-project.eu). Eguneratze-data: 2015/01/25.

[28] <http://www.phytosudoe.eu/en/>. Eguneratze-data: 2018/01/25.