

Hondakin-uren araztegieta sortutako lokatzei balioa emateko estrategia berriak

(New Strategies for the Valorization of Sludge from Wastewater Treatment Plants)

Irene Sierra^{1*}, Eva Epelde², Unai Iriarte¹

¹ Ingeniaritza Kimikoa Saila, Farmazia Fakultatea (UPV/EHU)

² Ingeniaritza Kimikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

LABURPENA: Azken hamarkadetan, hondakin-uren tratamenduan sortutako lokatzen kantitatea nabarmen hazi da, industrializazioaren eta urbanizazioaren ondorioz. Araztegi-lokatzak izaera toxikoa eta patogenikoa duten substantzietz osatuta daude. Hori horrela, berebiziko garrantzia dute lokatzak kudeatzeko estrategiak hobetzeak eta metodo berriak bilatzeak. Lokatza kudeatzeko estrategien artean, errausketa eta konpostajea nabarmendu dira historian zehar, baina, gaur egun, lokatzak prozesu termo-kimiko baten bidez tratatzea proposatzen da aukera ekonomiko eta jasangarri gisa. Lortzen den material solidoa (biochar izeneko) erabilera anitzeko materiala da. Lan honetan azaltzen da nola sortzen diren araztegi-lokatzak hondakin-uren tratamenduan, eta zer ezaugarri eta konposizio duten. Jarraian, biocharren prestakuntza (aktibazio fisikoa, kimikoa, karbonizazio hidrotermikoa eta bestelako tratamenduak) eta karakterizazioa (konposizioa eta morfologia, nagusiki) azaltzen dira. Azkenik, biocharren zenbait aplikazio aurkezten dira: adsortzioa egiteko, katalizatzaile gisa erabiltzeko, gasak biltegitzeko (esate baterako, H₂, O₂ eta CH₄), lurzorian aplikatzeko, eta bioerregai gisa erabiltzeko. Biocharren ezaugarri optimoak eman nahi zaion erabilaren arabekoak dira, eta prestakuntza-metodoa doitu egin daiteke nahi diren ezaugarri fisiko-kimikoak lortzeko.

HITZ GAKOAK: hondakin-uren tratamendua, araztegi-lokatzak, biochar, aktibazio fisikoa, aktibazio kimikoa.

ABSTRACT: *The amount of sludge produced in wastewater treatment has increased significantly over the last decades, due to industrialization and urbanization. Sewage sludge is composed of toxic and pathogenic substances, and consequently, the improvement of its management and the search of new strategies is an issue of particular concern. Among the traditional options to manage sewage sludge, incineration and composting have been widely used. Nevertheless, nowadays the valorization of sludge by means of a thermochemical procedure is proposed as an economical and sustainable strategy. The solid material obtained (biochar or sludge carbon) is a material with a wide range of applications. This work addresses the production of sludge during wastewater treatment, along with its characteristics and composition. Moreover, the preparation methods of biochar are discussed (physical activation, chemical activation and hydrothermal carbonization, among others). The characterization of biochar (mainly composition and morphology) is also explained. Finally, the potential applications of biochar are discussed: as an adsorbent, in catalysis, in gas storage (for example, H₂, O₂ and CH₄), as a soil amendment and as a biofuel. The optimal physicochemical properties of biochar depend on the desired application, and they can be adjusted by means of the preparation procedure.*

KEYWORDS: *wastewater treatment, sewage sludge, biochar, physical activation, chemical activation.*

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Irene Sierra. Ingeniaritza Kimikoa Saila, Farmazia Fakultatea, UPV/EHU (Gasteiz).  <https://orcid.org/0000-0003-3555-978X>, irene.sierra@ehu.eus

Nola aipatu/How to cite: Sierra, Irene; Epelde, Eva; Iriarte, Unai (2025). «Hondakin-uren Araztegieta Sortutako Lokatzei Balioa Emateko Estrategia Berriak», *Ekaia*, 47, 2025, 373-387. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.26316>).

Jasoa: maiatzak 15, 2024; Onartua: ekainak 12, 2024

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Hondakin-urek ingurumen-arazo larriak sor ditzakete, baldin eta era egokian kudeatzen ez badira. Izan ere, hondakin-urek zenbait kutsatzaile dituzte (hala nola metal astunak, materia organikoa, etab.) ur-masak kutsa ditzaketenak. Arazo hori konpontzeko, hondakin-uren araztegiak (HUA) erabiltzen dira, hirietako eta industriako hondakin-urak arazteko (garbitzeko) ingurumenera itzuli baino lehen. Hondakin-uren tratamenduak kutsadura-arazo bat konpontzen du, baina, aldi berean, kudeaketa berezia behar duen hondakina sortzen du: lokatza, alegia. Hondakin-urei beren izaera toxikoa eta patogenikoa ematen dioten substantzietz osatuta dago lokatza, eta, horrenbestez, garrantzi handia du haren kudeaketak. Araztegietan sortzen diren lokatzak kudeatzeko ohiko aukerak hauek dira: lurrak betetzea, erraustea (hau da, erretzea, energia berreskuratzeke), konposta egitea nekazaritzan ongari gisa erabiltzeko, edo zabor-tegira eramatea.

Araztegiatiko lokatzak kudeatzeko ordezeko aukeren interesa nabarmen handitu da azken urteetan, zenbait arrazoi direla medio. Alde batetik, azken hamarkadetan handitu egin da lokatzen kantitatea, industrializatzearen eta urbanizatzearen garapen azkarraren ondorioz. Bestetik, aipatu behar da bigarren mailako kutsadura ekiditeko gero eta murriztaileagoa den ingurumen-legedia. Hau da, erabilitako teknologiak ez du ingurumena kaltetu behar, eta horrek ohiko teknologien bideragarritasuna murrizten du. Esate baterako, lokatzetan dauden zenbait kutsatzailek (hala nola metal astunak) mugatu egiten dute lurrak betetzeko edo nekazaritzan erabiltzeko aukera [1]. Errausketari dagokionez, lokatzak erretzean sortzen diren gasek atmosfera kutsa dezakete. Ingurumen-legediaz gain, ezin dugu ahaztu gaur egun gora doan eskakizuna energia eta materialak berreskuratzeke, jasangarritasunaren eta ekonomia zirkularraren ildoan.

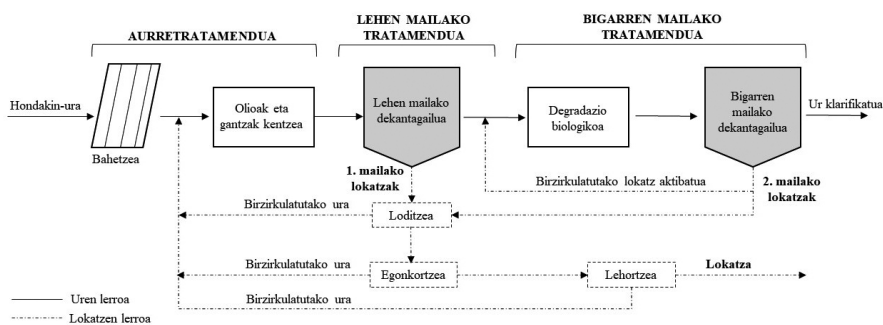
Lokatzak kudeatzeko ordezeko estrategien artean, lokatzak prozedura termokimiko baten bidez tratatzea irtenbide egokia da ikuspuntu ekonomikotik, baita ingurumena babestearen ikuspuntutik ere. Lortzen den material solidoa (biochar izenekoa) erabilera anitzeko materiala da, propietate hauen ondorioz: porotasuna eta karbono-eduki handia, ioiak trukatzeko gaitasuna, egonkortasuna eta talde funtzionalen aniztasuna. Erabilera horietako zenbait uraren tratamenduarekin erlazionatzen dira, hainbat kutsatzaile kentzeko (esate baterako, metal astunak, koloratzaileak, fosfatoak eta nitratoak) [2]. Araztegi-lokatzetatik eratorritako biocharra gas-kutsatzaileak kentzeko ere erabil daiteke, hala nola SO₂ edo nitrogeno oxidoak [3]. Halaber, biocharra zoruan aplikatu daiteke, zenbait helbururekin: zoruak ongarritzea, zoruak atxikitzen duten ur kantitatea handitzea, etab. [4]. Badira bestelako erabilerak; esate baterako, H₂, O₂, CH₄ eta antzeko gasak biltegitratzea, edo biocharra erregai gisa erabiltzea energia sortzeko [2,3]

Biocharraren propietate optimoak materialari emango zaion erabilera-
ren menpekoak dira. Adibidez, porotasun handiko materialak egokiak dira
gasak biltegitzeko edo kutsatzaileak kentzeko; aldiz, materialaren konpo-
sizioa erabakigarria da zorueta aplikatzeko. Materialaren propietateak lok-
katzaren jatorriaren arabera dira, eta prestakuntza-metodoarekin doitu
daitezke [5]. Lan honetan, ikuspegi orokorra eskaintzen da araztegi-loka-
tzei balioa emateko egungo teknologiei buruz, eta ekoiztako materialen
aplikagarritasuna aztertzen da. Horretarako, materialen ezaugarri fisiko-ki-
mikoak azaltzen dira.

2. ARAZTEGIETAKO LOKATZAK

2.1. Lokatzen sorrera

Lokatzen hondakin-uren araztegieta sortzen diren azpi produktuak dira.
1. irudian hondakin-uren araztegi baten eskema orokorra erakusten da.



1. irudia. Hondakin-uren araztegi baten eskema orokorra [3].

Hondakin-ura araztegieta sartzen denean, lehenik eta behin aurretrata-
mentu izeneko etapa egiten da. Hartan, osagai hauek kentzen dira: solido
lodiak eta ertainak, solido meheak (hareak), olioak eta gantzak. Ondoren,
lehen mailako tratamendua dator, aurretik kendu ez diren solido esekiak
bereizteko; hau da, uretan sakabanatuta dagoen materia kentzeko. Solido
esekiak kentzeko, lehen mailako dekantagailuak erabiltzen dira. Haietan,
solidoak grabitatez banatzen dira eta beheko partean biltzen dira, lehen
mailako lokatzak osatuz. Solido esekiak bereizi ondoren, bigarren maila-
ko tratamendura bideratzen da ur zikina. Eragiketa horren helburua ma-
teria organikoa kentzea da. Horretarako, degradazio biologikoa egiten da,
bereziki garatutako mikroorganismoak erabiliz. Prozesu biologikoaren on-
doren, beste dekantazio bat egin behar da, ura eta solido esekiak bereizteko
(mikroorganismoek osatuta hein handi batean). Bigarren mailako dekan-

gailutik bi korronte ateratzen dira. Goiko korrontea (ur klarifikatua) hirugarren mailako tratamendura bideratzen da, eragiketa gehigarriak egiteko (esate baterako, nitrogenoa eta fosforoa kentzea). Beheko korrontean kontzentratuta agertzen dira solido esekiak. Korronte hori bi zatitan banatzen da: frakzio bat erreaktore biologikora bideratzen da, bertako biomasa (mikroorganismoen kantitatea) mantentzeko. Soberako frakzioa, aldiz, atera egiten da, eta bigarren mailako lokatzak osatuko ditu.

Lokatzek zenbait tratamendu hartzen dituzte araztegiko lokatzen le-roan: loditzea (solido esekien kontzentrazioa handitzeke), egonkortzea (ondoren gerta daitekeen degradazioa saihesteko), eta ura kentzea. Lokatzen tratamenduaren kostua HUA operatzeko kostu osoaren %20-60 bitartekoa da [6], eta, beraz, funtsezkoa da material horri balioa emateko estrategia eraginkorrak aurkitzea.

2.2. Lokatzen konposizioa

Zenbait parametrok dute eragina araztegi-tako lokatzen konposizioan (lokatzen iturria, hondakin-uren tratamenduan egindako eragiketak, urtaroa, etab.), eta, horren ondorioz, oso handia da aldakortasuna [7]. Araztegi-lokatza hainbat konposaturen nahaste konplexu eta heterogeneoa da: ura, mikroorganismoak, degradatu gabeko materia organikoa eta substantzia ez-organikoak. Materia organikoaren edukia %60 da oinarri lehorrean (ura kontuan izan gabe), eta osagai nagusi hauek ditu: bakterioen osagaiak (proteinak, peptidoak, lipidoak, polisakaridoak) eta digeritu gabeko materia organikoa [8]. Lokatzak nitrogenoa eta fosforoa ditu, zenbait eratan. Halaber, handia da gatz ez-organikoen kontzentrazioa. Gatzetan espezie ugari aurki daitezke; haien artean, anioiak (negatiboki kargatutako espezieak; esate baterako, karbonatoak, fosfatoak, sulfatoak eta nitratoak), «metal astunak» (Zn, Pb, Ni, Cd, Cr, Cu, As, Hg, etab.) eta bestelako elementuak (adibidez, Si, Al, K, Na, Ca eta Mg) [9]. Ingurumen-arazoak sor ditzaketen konposatuak ere ager daitezke, hala nola zenbait konposatu organiko (konposatu organiko iraunkorrak, botikak, eta kosmetikoak), mikroplastikoak eta mikroorganismo patogenoak [10].

3. BIOCHARRAREN PRESTAKETA ETA EZAUGARRIAK

3.1. Biocharraren prestaketa

Zenbait metodo balia daitezke lokatzetatik eratorritako biocharra prestatzeko. Haien artean, erabilienak aktibazio fisikoa eta kimikoa dira. Metodo horietan, lehenengo urratsa lokatz hezea lehortzea da, materialak duen hezetasun handia murrizteko (ura osagai nagusia da). Hortaz, lehengai-lokatz lehorra izan ohi da.

Aktibazio fisikoan bi etapa egin ohi dira, elkarren segidan [11]. Lehenengo etapa lokatzaren aurretiko pirolisia da (hau da, oxigeno urriarekin egindako prozesu termikoa). Etapa horretan bitarteko tenperaturak baliatzen dira (400-700 °C), atomoen arteko loturak ahultzeko. Pirolisian, produktu solidoaz gain (biocharra), gas bat sortzen da (syngas), eta produktu likido bat sor daiteke. Pirolisia egiteko bi modu daude: pirolisi azkarra eta motela [9]. Pirolisi azkarrean, lehengai (lokatz) erreaktorean sartzen da ezarritako tenperatura lortu denean, eta segundo batzuez mantentzen da erreaktorearen barruan. Pirolisi motelaren kasuan, aldiz, lokatza erreaktorean sartzen da pirolisia baino lehen, eta ezarritako tenperaturan ematen duen denbora ordu erditik ordu batzuetara luza daiteke. Pirolisi azkarrarekin alderatuz, pirolisi motelean handiagoa da biocharraren etekina [9] eta, beraz, prozedura hori erabili ohi da helburua produktu solidoa denean.

Pirolisia erabiliz lortu den materialaren propietateak egokiak izan daitezke. Izan ere, pirolisiaren bitartez garatzen da material solidoaren egitura porotsua, gehienbat materia organikoaren deskonposizio termikoaren ondorioz (materia solidoa gas fasera pasatzean, poroak zabaltzen dira) [12]. Hori dela eta, batzuetan ez da beste urrats bat gehitu behar. Egitekotan, aktibazio fisikoa gas oxidatzaile bat tenperatura altuetan (800-1200 °C) erabiltzean datza (CO₂, H₂O edo airea) [12]. Prozedura horren bitartez, egitura porotsua gehiago garatzen da, materia solidoaren gasifikazioa eragiten duten zenbait fenomeno gertatzen direlako; besteak beste: (i) karbono-atomoen oxidazioa, erabilitako gasaren izaeragatik, (ii) materia ez-organikoaren deskonposizio termikoa, eta (iii) konposatu organikoaren deskonposizioa [13]. Horretaz gain, aktibazio-gasek biocharraren gainazaleko talde funtzionalak alda ditzakete (talde berriak sortu), eta, horrela, materialaren azidotetasuna edo basikotasuna alda dezakete [12].

Aktibazio kimikoan, aitzindaria (lokatz edo aurretik pirolizatu den lokatza) konposatu kimiko batekin nahasten da, eta, ondoren, 450-700 °C-an berotzen da gas inerte baten eraginpean (hau da, erreakzionatzen ez duen gasa; nitrogenoa, esate baterako) [12]. Agente kimiko ugari erabil daitezkeen arren (azidoak, konposatu basikoak eta gatzak), hauek dira gehien erabili direnak: azido fosforikoa (H₃PO₄), zink kloruroa (ZnCl₂), azido sulfurikoa (H₂SO₄) eta potasio hidroxidoa (KOH) [12]. Agente kimikoak zenbait helbururekin erabiltzen dira; besteak beste: (i) talde funtzionalak doitzeko, (ii) likidoaren eraketa saihesteko (eta, hala, tratamendu termikoan biochar solidoa eta gasa bakarrik eratzeko), eta (iii) materialaren egitura porotsua doitzeko [12, 13]. Gehitutako konposatu kimikoak zenbait eragin izan ditzake; esate baterako, lokatzaren osagaiekin erreakzionatu dezake, edo zenbait erreakzio kataliza ditzake, beste eraginak beste.

Aktibazio fisikoa eta kimikoa alderatzen baditugu, aktibazio fisikoa merkeagoa da eta arduratsua ingurumenarekin, ez baitu produktu kimikorik erabiltzen [14]. Aktibazio kimikoaren abantailei dagokienez, eragin-

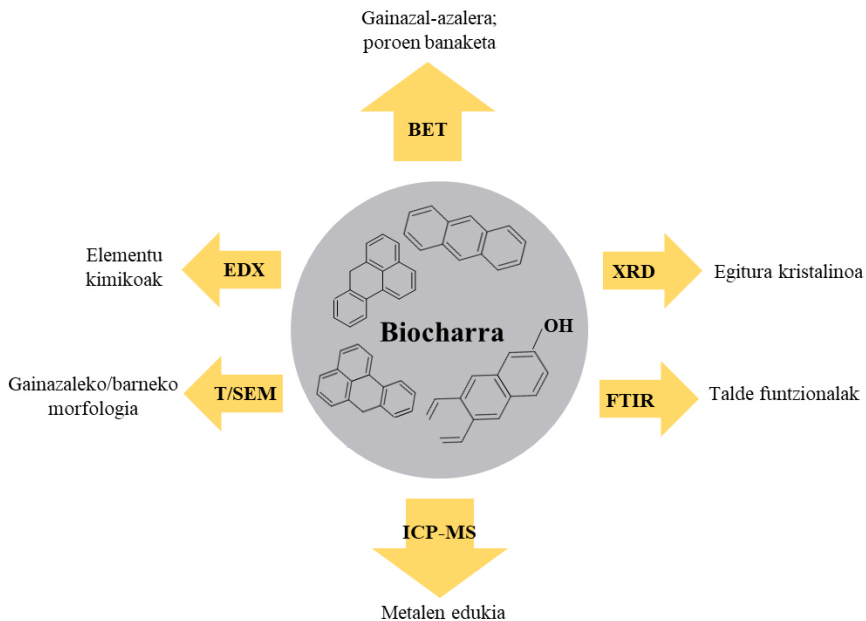
korragoa da materialaren porotasuna garatzeko [12]. Horretaz gain, aktibazio kimikoaren energia-kontsumoa txikiagoa da, tenperatura baxuagoak eta tratamendu-denbora laburragoak erabili ohi direlako [15].

Biocharra ekoizteko beste metodo termokimiko bat karbonizazio hidrottermikoa da (HTC); metodo hori aurretratamendu gisa ere erabil daiteke. Metodo horretan, lokatza presiopean tratatzen da ur beroarekin (180-250 °C bitarteko tenperaturak erabili ohi dira) [16]. HTC metodoak ura erabiltzen du erreakzio-ingurune gisa, eta, horren ondorioz, araztegi-lokatza ez da aurretik lehortu behar. Hala, energia aurrezteko lortzen da.

Araztegi-lokatzaaren aktibazio-prozesuaren ondoren, bestelako tratamenduak egin daitezke: garbiketa azidoa edo alkalinoa, adibidez. Garbiketa azidoa oso eragiketa erabilia da. Tratamendu horretan, H₂SO₄ edo antzeko azidoak baliatzen dira zenbait helbururekin: esate baterako, materia ez-organikoa kentzea materialaren porotasuna handitzeko, edo gainazalean talde funtzionalak sartzeko [3]

3.2. Biocharren karakterizazioa

Biocharra prestatu ondoren, materialaren karakterizazioa egin behar da, duen konposizio kimikoa eta morfologia ezagutzeko. Horretarako, zenbait teknika analitiko erabiltzen dira (ikus 2. irudia).



2. irudia. Biocharren karakterizazioa egiteko metodoak [9].

Biocharraren ehundura-propietateak neurtzeko, nitrogenoaren adsortzioa erabiltzen da. Propietateen artean, BET gainazal-azalera da erabiliena. Entsegu horretan, nitrogenoaren adsortzio-ahalmena neurtzen da presio ezberdinetan, eta lortutako datuak Brunauer, Emmett eta Teller-en adsortzio-eredura doitzen dira [17]. Teknika horren bidez bestelako parametroak ere neur daitezke: esate baterako, poroen bolumena eta azalera (tamainaren arabera banaketa eta guztizko balioak).

Biocharraren C, H, O, N eta S elementuen edukia zehazteko, elementu-analizatzaileak erabiltzen dira. Metalen edukia neurtzeko, aldiz, ICP-MS erabil daiteke (masa espektroskopia, indukzioz akoplatutako plasma erabilia).

Fourier transformazioaren bidezko infragorri espektroskopian (FTIR), biochar partikulen gainazaleko talde funtzionalak zehazten dira, talde funtzional bakoitzak maiztasun tarte zehatz batean xurgatzen baitu erradiazio infragorria. Talde funtzionalak karbonodun egitura bati loturiko atomomultzo espezifikokoak dira; esate baterako, hidroxilo taldea (-OH) edo karboxilo taldea (C=O). Talde funtzionalek konposatuen erreaktibotasuna eta propietateak baldintzatzen dituzte.

Mikroskopia elektronikoa balia daiteke biocharraren morfologia aztertzeko. Eskaneatze-mikroskopia elektronikoa erabiliz (SEM), gainazalaren morfologia hiru dimentsiotan ikus daiteke eskala nanometrikoan, elektroien eta materialen arteko elkarrekintzan oinarrituz. Are handiagoa da transmisio-mikroskopia elektronikoa (TEM) teknikaren bereizmena, eta atomoen arteko distantziak eta barne-egituraren irudiak lor ditzake. Mikroskopia elektronikoarekin batera X izpien mikroanalisi (EDX) teknika erabil daiteke. Teknika horren bidez, biocharraren gainazaleko elementu kimikoen banaketa zehaztu daiteke; hau da, gainazalaren konposizio kimikoa.

Badaude bestelako teknikak materialaren karakterizazioa osatzeko. Esate baterako, X izpien difrakzioa (XRD) erabiliz materialaren egitura kristalinoa ikertu daiteke. Oro har, biocharra kristalinotasun-maila txikiko materiala da (amorfoa).

4. BIOCHARRAREN APLIKAZIOAK

Araztegi-lokatzetatik eratorritako biocharrak erabilera anitz ditu. Lehen esan bezala, materialaren ezaugarri optimoak ezberdinak dira aplikazioaren arabera, eta prestakuntza-metodoa doitu egin daiteke nahi diren ezaugarri fisikokimikoak lortzeko.

4.1. Adsortzioa

Adsortzioaren bidez, zenbait kutsatzaile lotzen zaizkio material solido baten gainazalari, erakarpen indarregatik. Material bat adsortzioan erabil-

tzeko egokia izan dadin, handia izan behar du haren porotasunak. Adsorztzioa egiteko material solido ugari erabil daitezke, baina ikatz aktibatua da erabiliena. Araztegi-lokatzetatik eratorritako biocharra zenbait kutsatzaile kentzeko erabiltzea ikertu izan da, fase likidoan eta gas fasean. Biocharraren bideragarritasun ekonomikoa balioztatzeko, bi alderdi nagusi izan behar dira kontuan: kutsatzailea kentzeko eraginkortasuna, eta kostua. Xu-k eta lankideek ondorioztatu zuten lokatzetatik eratorritako biocharra prestatzeko kostua 10-20 aldiz txikiagoa dela ikatz aktibatu komertziala ekoizteko kostuaren aldean [11].

4.1.1. *Fase likidoan (hondakin-uren tratamendua)*

Egindako ikerketen arabera, araztegi-lokatzetatik eratorritako biocharra eraginkorra da hondakin-uretatik kutsatzaile ugari kentzeko: botikak, koloratzaileak, metal astunak, etab. [2]. Biocharraren zenbait propietate fisikokimikok baldintzatzen dute biocharraren adsortziorako ahalmena: gainazal-azalera eta talde funtzionalak, besteak beste [18].

Biocharrak dituen gainazal-azalera eta porotasun handiek ahalbidetzen dute antibiotikoak adsortzio bidez kentzea. Zenbait antibiotikoren adsortzioa ikertu izan da, lokatzetatik eratorritako biocharra erabiliz: esate baterako, sulfametoxazola [19] eta tetraziklina [20]. Metal astunen kasuan, emaitza esperantzagarriak lortu dira zenbait metal kentzeko: Cd, Cu, Zn eta Pb, esaterako [21]. Kasu batzuetan, biocharrarekin lan egitean emaitza hobekak lortu dira ikatz aktibatuarekin baino. Aktibazio kimikoaren bidez prestatutako materialak eraginkorragoak direla ikusi da, arrazoi hauengatik: (i) gainazal-azalera handiagoa da, eta (ii) talde funtzionalak ugariagoak dira [11].

Biocharra erabili izan da bestelako kutsatzaileak kentzeko, hala nola koloratzaileak. Konposatu horiek oso erabiliak dira zenbait arlotan: elikagaigintzan, botiken eta kosmetikoen industrian, papergintzan, larrugintzan, ehungintzan eta pinturen industrian, besteak beste. Koloratzaileak kentzeko egindako ikerketen arabera, biocharra eraginkorragoa izan daiteke ikatz aktibatu komertziala baino [22]. Gure ikerkuntza-taldean metileno urdina koloratzailearen adsortzioa ikertu izan dugu, araztegiko lokatzetatik eratorritako biocharra baliatuz [13, 23]. Egindako ikerketetan, aktibazio fisikoa (CO₂-arekin) eta kimikoa erabili ditugu biocharra prestatzeko. Emaitza onenak lortu dira agente kimikoak erabiltzean (K₂CO₃ eta HCl, gehienbat).

4.1.2. *Gas kutsatzaileak*

Aktibazio fisikoren edo kimikoaren ondoren, biocharraren gainazala aberatsa da talde funtzionaletan. Gainera, materialaren kristal-egitura ordenatuagoa da, eta hori abantaila da gas-poluitzaileak kentzeko [3]. Halaber, kutsatzaileak adsortzioaren bidez kentzeko ahalmena porotasunarekin erlazionatzen da.

Luján-Facundo-k eta lankideek ikertu zuten H₂S-aren adsortzioa bi material erabiliz: lokatzetatik eratorritako biocharra eta ikatz aktibatu komertziala [24]. Haien emaitzen arabera, bikaina da lokatzetik eratorritako biocharren adsortzio-ahalmena, ikatz aktibatu komertzialarena gainditzen baitu. Biocharren eraginkortasuna handitzeko edota kutsatzaile bat baino gehiago aldi berean kentzeko, zenbait substantzia gehitu daitezke. Esate baterako, Fan eta Zhang-en ikerketaren arabera, kitosanoarekin egindako inpregnazioak asko hobetu dezake SO₂ eta NO gasen eliminazioa [25]. Chen-ek eta lankideek KOH erabili zuten biocharra prestatzeko, eta aurkitu zuten biocharren NO-aren adsortzio-ahalmena oso egokia zela, ikatzetik eratorritako ikatz aktibatuarena baino hobea [26].

4.2. **Katalisia**

Katalizatzaileak erreakzio kimikoak azkartzeko erabiltzen diren substantziak dira. Katalizatzaile baten osagai nagusiak bi dira: (i) fase aktiboa: aktibitatea duen osagaia, alegia, eta (ii) euskarria: hau da, fase aktiboaren egonkortasuna eta sakabanaketa hobetzen dituen osagaia. Lokatzetatik eratorritako biocharra katalisian erabili izan da. Zenbait kasutan, kanpotik inolako fase aktiborik gehitu gabe baliatu da. Izan ere, biocharrean hainbat substantzia daudenez, maiz fase aktibo gisa joka dezakete. Beste kasu batzuetan euskarri moduan erabili izan da, zenbait ehundura-proprietatek material egokia bilakatzen baitute katalisian erabiltzeko; haien artean, porotatsuna eta gainazal-azalera espezifikoak nabarmentzen dira [3].

Lu-k eta lankideek emaitza onak lortu dituzte toluenoaren cracking katalitikoan (%97ko bihurtze-mailak lortu dituzte; hau da, elikaturiko toluenoaren %97k erreakzionatzen du) [27]. Franco-k eta lankideek katalizatzaile eraginkorrak prestatu dituzte banilina izeneko zapore-emailea ekoizteko, isoeugenolaren oxidazioaren bidez [28].

Biocharra erabili izan da hondakin-uretatik konposatu organiko erre-fraktarioak (biodegradarriak ez diren substantziak) kentzeko, oxidazio aurreratuko prozesuak erabiliz. Prozesu horietan, oxigeno-espezie oso erreaktiboak sortzen dira (esate baterako, ·OH erradikala), katalizatzaileak erabiliz [2]. Espezie horiek kutsatzaileak oxidatzen dituzte. Oxidazio aurreratuko prozesuen artean, aire hezearen bidezko oxidazio katalitikoak ikertu izan da konposatu fenolikoak kentzeko [29, 30]. Lortutako emaitzen arabera, lokatzetatik eratorritako biocharren portaera katalitikoak egokia da, duen metal-eduki handiaren ondorioz, eta oso hurbil dago ikatz aktibatu komertzialaren portaeratik. Beraz, biocharra katalizatzaile egokia da konposatu fenolikoak suntsitzeko. Halaber, bestelako oxidazio aurreratuko prozesuetan ere erabili izan da biocharra, hala nola Fenton prozesuan. Prozesu horretan biocharra zuzenean erabili izan da katalizatzaile gisa, duen burdin-eduki handiagatik [2].

Lokatzetatik eratorritako biocharra katalizatzaileen euskarri gisa ere erabil daiteke. Euskarriak katalizatzailearen aktibitatea handitu dezakeela ikusi da, katalizatzailearen fase aktiboarekin edo beste osagaiekin duen efektu sinergikoaren ondorioz [3]. Horren adibide da Peng-ek eta lankideek prestatu zuten araztegi-lokatzetatik eratorritako biocharra (N eta Fe-arekin dopatuz), Pt-zko katalizatzaileen euskarri gisa erabiltzeko metanolaren elektrooxidazioan [31]. Emaizten arabera, Pt/biochar katalizatzailearen aktibitateak gaintitu egin zuen Pt/C katalizatzaile komertzialarena, biocharra-aren efektu sinergiko hobearen ondorioz.

4.3. Gasak biltegitratzea

Gaur egun, zenbait gas biltegitratzeko (esate baterako, H_2 , O_2 eta CH_4), lehenbizi likidotu egiten dira presio altuak erabiliz. Ondoren, gas likidotua bonbonetan gordetzen da. Metodo hori garestia eta arriskutsua da, eta, ondorioz, interes handia dute ordezko metodoek. Adibidez, material porotsuak gasak biltegitratzeko erabil daitezke, adsortzioa erabiliz. Material porotsuen artean, lokatzetatik eratorritako biocharra dago. Material horren propietateak doitu egin daitezke gasak biltegitratzeko egokiak izan daitezkeen: besteak beste, BET gainazal-azalera eta poroen bolumen handia [3]. Biocharra gasak biltegitratzeko etorkizun handiko materiala den arren, oraindik ez dago ia ikerketarik aplikazio horren inguruan.

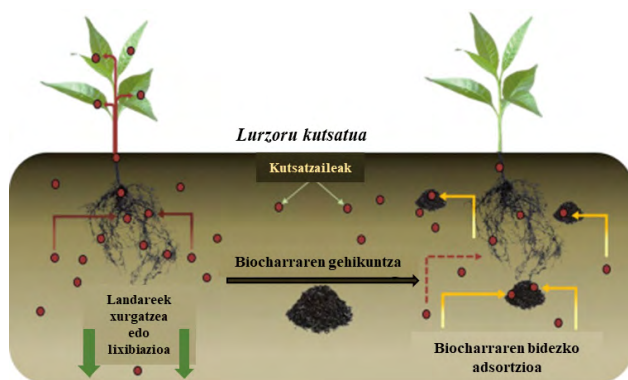
4.4. Aplikazioa zoruetan

Araztegi-lokatzak nekazaritzan erabil daitezke zenbait helbururekin: esate baterako, zoruaren propietateak hobetzeko eta ongari gisa. Halaber, lokatza eraginkorra da adsortzioa egiteko. Hala ere, kontuan izan behar da lokatzetatik eratorritako biocharren adsortzio-ahalmena askoz handiagoa dela tratatu gabeko lokatzaren aldean [12]. Izan ere, biocharra oso material eraginkorra da lurzoruko poluitzaileak modu iraunkorrean atxikitzeko (3. irudia).



3. irudia. Araztegi-lokatzak zoruaren erabiltzeko bideak [12].

Biocharra aberatsa da karbonoan, eta zoruan aplikatzen bada, nekazaritzarako zuzentze-material egokia da (hau da, zorua kalitatea hobetzen du). Eduki organikoaz gain, biocharrak zorua ura atxikitzen ahalmena handitzen du (duen porotasun altuaren ondorioz), eta, hala, uraren eta ongarrien beharra gutxitzen du [32]. Biocharrak badu beste eragin positibo bat: lixibiazioa gutxitzea, alegia [12]. Lixibiazioan, urak zorutik kentzen ditu elikagai disolbagarriak (gatzak, mineralak), beheko geruzetara arrastatzen dituelako. Lixibiazioa murriztean, handitu egiten da zoruen emankortasuna. Biocharra lurzoru poluitu batean aplikatzen bada, berriz, zorua ioi-trukerako ahalmena handitzen da [12]. Ioi-trukean, ioi batzuek (kargatutako espezieek, hau da, katioiek edo anioiek) beste batzuk ordezkatzeko dituzte. Horren ondorioz, biocharrak zenbait kutsatzaile atxikitzen ditu, eta hala, gutxiago geratzen dira landareentzat eskuragarri. Hortaz, efektu babeslea sortzen da elika-katean (4. irudia).



4. irudia. Biocharrak zoru poluituetan duen eragin babeslea [12].

4.5. Bioerregai solidoa

Lokatetatik eratorritako biocharra energia sortzeko erabil daiteke, errekontzaren bidez. Hau da, bioerregai solido gisa balia daiteke elektrizitatea edo beroa ekoizteko. Hainbat ikerketa egin dira aplikazio horren inguruan. Adibidez, Udayanga-k eta lankideek egindako ikerketaren arabera, handia da lokatetatik eratorritako biocharrak errekontzian erabiltzeko duen potentziala, arrazoi hauek direla eta (besteak beste): bero-ahalmen handia (hau da, material-unitateko askatzen den beroa) eta temperatura altuen aurrean duen egonkortasuna [33].

Hala ere, biocharra bioerregai gisa erabili ahal izateko, kontuan izan behar da errekontzak airearen poluzioa eragin dezakeela. Ildo horretatik, biocharrak dituen nitrogenoak eta sufreak kutsatzaile atmosferikoak sor ditzakete (nitrogeno oxidoak eta sufre oxidoak, hurrenez hurren). Tong-ek

eta lankideek arazo hori ikertu zuten, eta aurkitu zuten HTCrekin egindako aurretratamenduak nabarmen murriztu dezakeela biocharraren N eta S edukia [34].

ONDORIOAK

Araztegi-lokatzak kudeatzeko ordezko aukeren interesa nabarmen handitu da azken urteetan, bi arrazoi direla medio: lokatzen kantitatearen hazkundera, eta gero eta murriztaileagoa den ingurumen-legedia (zeinak ohiko irtenbideen aplikagarritasuna murrizten baitu). Artikulu honen proposamena da araztegi-lokatzei balioa emateko aukera ekonomiko eta jasagarri gisa biochar izeneko material solidoa ekoiztea, prozedura termokimikoak baliatuz (esate baterako, aktibazio fisikoa edo kimikoa). Biocharra erabilerara anitzeko materiala da, dituen propietateen ondorioz (porotasun handia eta karbono-eduki handia, ioiak trukatzeko gaitasuna, egonkortasuna eta talde funtzionalen aniztasuna). Erabilerara horietako zenbait uraren tratamendurekin erlazionatzen dira hainbat kutsatzaile kentzeko: antibiotikoak, koloratzaileak, metal astunak, konposatu organiko errefraktarioak (konposatu fenolikoak eta antzekoak). Biocharra gas-kutsatzaileak kentzeko ere erabil daiteke, hala nola H₂S, SO₂ eta NO. Halaber, biocharra zoruan aplikatu daiteke, zenbait helbururekin: emankortasuna eta ura atxikitzeak ahalmena handitzea, eta elika-katean efektu babeslea sortzea. Biocharraren beste aplikazio-arlo bat katalisia da, erreazio kimikoak azkartzeko (toluenoaren cracking katalitikoan erabili izan da, adibidez). Badira bestelako aplikazioak: esate baterako, bioerregai gisa erabiltzea elektrizitatea edo beroa ekoizteko, edo gasak biltegitratzea (H₂, O₂, CH₄, etab.). Biocharraren propietate optimoak materialari emango zaion erabileraren menpekoak dira. Adibidez, porotasun handiko materialak egokiak dira gasak biltegitratzeko edo kutsatzaileak kentzeko; aldiz, materialaren konposizioa erabakigarria da zoruetan aplikatzeko. Materialaren propietateak lokatzaren jatorriaren arabera dira, eta prestakuntza-metodoarekin doitu daitezke.

ESKER ONAK

Artikulu honek Eusko Jaurlaritzaren (GV-2018-00038 proiektua) eta Espainiako Zientzia, Berrikuntza eta Unibertsitate Ministerioaren (PID2022-140584OB-I00) dirulaguntza jaso du.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] 453/2013 Dekretua, azaroaren 26koa, Euskal Autonomia Erkidegoko nekazaritza-lurretan lohiak erabiltzeari buruzkoa

- [2] GOPINATH, A., DIVYAPRIYA, G., SRIVASTAVA, V., LAJU, A.R., NIDHEESH, P.V. eta KUMAR, M.S. 2021. «Conversion of sewage sludge into biochar: A potential resource in water and wastewater treatment». *Environmental Research*, **194**, 110656.
- [3] XIAO, Y., RAHEEM, A., DING, L., CHEN, W.H., CHEN, X., WANG, F. eta LIN, S.L. 2022. «Pretreatment, modification and applications of sewage sludge-derived biochar for resource recovery – A review». *Chemosphere*, **287**, 131969.
- [4] LEHMANN, J. eta JOSEPH, S. 2009. *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan, London.
- [5] ZIELINSKA, A., OLESZCZUK, P., CHARMAS, B., SKUBISZEWSKA-ZIEBA, J. eta PASIECZNA-PATKOWSKA, S. 2015. «Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **112**, 201-213.
- [6] KWARCIAK-KOZŁOWSKA, A. 2019. «Co-composting of sewage sludge and wetland plant material from a constructed wetland treating domestic wastewater». *Industrial and Municipal Sludge*. Butterworth-Heinemann, 337-360.
- [7] RORAT, A., COURTOIS, P., VANDENBULCKE, F. eta LEMIERE, S. 2019. «Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management». *Industrial and Municipal Sludge*. Butterworth-Heinemann, 155-180.
- [8] CHEN, Y.D., LI, S., HO, S.H., WANG, C., LIN, Y.C., NAGARAJAN, D., CHANG, J.S. eta REN, N.Q. 2018. «Integration of sludge digestion and microalgae cultivation for enhancing bioenergy and biorefinery». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **96**, 76-90.
- [9] WANG, J. eta WANG, S. 2019. «Preparation, modification and environmental application of biochar: A review». *Journal of Cleaner Production*, **227**, 1002-1022.
- [10] MARTÍN-POZO, L., DE ALARCÓN-GÓMEZ, B., RODRÍGUEZ-GÓMEZ, R., GARCÍA-CÓRCOLES, M.T., ÇIPA, M. eta ZAFRA-GÓMEZ, A. 2019. «Analytical methods for the determination of emerging contaminants in sewage sludge samples. A review». *Talanta*, **192**, 508-533.
- [11] XU, G., YANG, X. eta SPINOSA, L. 2015. «Development of sludge-based adsorbents: Preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment». *Journal of Environmental Management*, **151**, 221-232.
- [12] GRIFONI, M., PEDRON, F., ROSELLINI, I. eta PETRUZZELLI G. 2019. «From waste to resource: Sorption properties of biological and industrial sludge». *Industrial and Municipal Sludge*. Butterworth-Heinemann, 595-621.
- [13] SIERRA, I., IRIARTE-VELASCO, U., AYASTUY, J.L. eta AGUAYO, A.T. 2023. «Production of magnetic sewage sludge biochar: investigation of the activation mechanism and effect of the activating agent and temperature». *Bio-mass Conversion and Biorefinery*, **13**, 17101-17118.
- [14] DEVI, P. eta SAROHA, A.K. 2016. «Improvement in performance of sludge-based adsorbents by controlling key parameters by activation/modification: a critical review». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **46**, 1704-1743.

- [15] HWANG, H.R., CHOI, W.J., KIM, T.J., KIM, J.S. eta OH, K.J. 2008. «The preparation of an adsorbent from mixtures of sewage sludge and coal-tar pitch using an alkaline hydroxide activation agent». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **83**, 220-226.
- [16] CHEN, Y.D., WANG, R., DUAN, X., WANG, S., REN, N.Q. eta HO, S.H. 2020. «Production, properties, and catalytic applications of sludge derived biochar for environmental remediation». *Water Research*, **187**, 116390.
- [17] THOMMES, M., KANEKO, K., NEIMARK, A.V., OLIVIER, J.P., RODRIGUEZ-REINOSO, F., ROUQUEROL, J. eta SING, K.S.W. 2015. «Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) ». *Pure and Applied Chemistry*, **87**, 1051-1069.
- [18] WANG, S., GUO, W., GAO, F. eta YANG, R. 2017. «Characterization and Pb(II) removal potential of corn straw- and municipal sludge-derived biochars». *Royal Society Open Science*, **4**, 170402.
- [19] SHIMABUKU, K.K., KEARNS, J.P., MARTINEZ, J.E., MAHONEY, R.B., MORENO-VASQUEZ, L. eta SUMMERS, R.S. 2016. «Biochar sorbents for sulfamethoxazole removal from surface water, stormwater and wastewater effluent». *Water Research*, **96**, 236-245.
- [20] TANG, L., YU, J., PANG, Y., ZENG, G., DENG, Y., WANG, J., REN, X., YE, S., PENG, B. eta FENG, H. 2018. «Sustainable efficient adsorbent: alkali-acid modified magnetic biochar derived from sewage sludge for aqueous contaminant removal». *Chemical Engineering Journal*, **336**, 160-169.
- [21] SINGH, S., KUMAR, V., DHANJAL, D.S., DATTA, S., BHATIA, D., DHIMAN, J., SAMUEL, J., PRASAD, R. eta SINGH, J. 2020. «A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: Valorization, opportunities, challenges and future prospects». *Journal of Cleaner Production*, **269**, 122259.
- [22] DE GISI, S., LOFRANO, G., GRASSI, M. eta NOTARNICOLA, M. 2016. «Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: a review». *Sustainable Materials and Technologies*, **9**, 10-40.
- [23] SIERRA, I., IRIARTE-VELASCO, U., GAMERO, M. eta AGUAYO, A.T. 2017. «Upgrading of sewage sludge by demineralization and physical activation with CO₂: Application for methylene blue and phenol removal». *Microporous and Mesoporous Materials*, **250**, 88-99.
- [24] LUJÁN-FACUNDO, M.J., IBORRA-CLAR, M.I., MENDOZA-ROCA, J.A., ALCAINA-MIRANDA, M.I., MACIÁ, A.M., LARDÍN, C., PASTOR, L. eta CLAROS, J. 2020. «Preparation of sewage sludge-based activated carbon for hydrogen sulphide removal». *Water Air & Soil Pollution*, **231**, 187.
- [25] FAN, X.D. eta ZHANG, X.K. 2012. «Simultaneous removal of SO₂ and NO with activated carbon from sewage sludge modified by chitosan». *Applied Mechanics and Materials*, **253-255**, 960-964.
- [26] CHEN, H., CHEN, D., HU, Y., FENG, Y. eta DAI, X. 2020. «Preparation of activated sewage sludge char for low temperature De-NO_x and its CO emission inhibition». *Chemosphere*, **251**, 126330.

- [27] LU, P., QIAN, X., HUANG, Q., CHI, Y. eta YAN, J. 2016. «Catalytic cracking of toluene as a tar model compound using sewage-sludge-derived char». *Energy & Fuels*, **30**, 8327-8334.
- [28] FRANCO, A., FERNANDES DE SOUZA, J., PINHEIRO DO NASCIMENTO, P.F., MENDES PEDROZA, M., DE CARVALHO, L.S., RODRÍGUEZ-CASTELLÓN, E. eta LUQUE, R. 2019. «Sewage sludge-derived materials as efficient catalysts for the selective production of vanillin from isoeugenol». *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **7**, 7519-7526.
- [29] JULCOUR LEBIGUE, C., ANDRIANTSIFERANA, C., KROU, N., AYRAL, C., MOHAMED, E., WILHELM, A.M., DELMAS, H., LE COQ, L., GERENTE, C., SMITH, K.M., PULLKET, S., FOWLER, G.D. eta GRAHAM, N.J.D. 2010. «Application of sludge-based carbonaceous materials in a hybrid water treatment process based on adsorption and catalytic wet air oxidation». *Journal of Environmental Management*, **91**, 2432-2439.
- [30] STÜBER, F., SMITH, K.M., MENDOZA, M.B., MARQUES, R.R.N., FABREGAT, A., BENGUA, C., FONT, J., FORTUNY, A., PULLKET, S., FOWLER, G.D. eta GRAHAM, N.J.D. 2011. «Sewage sludge based carbons for catalytic wet air oxidation of phenolic compounds in batch and trickle bed reactors». *Applied Catalysis B: Environmental*, **110**, 81-89.
- [31] PENG, K., BHUVANENDRAN, N., RAVICHANDRAN, S., XU, Z., ZHANG, W., MA, Q., XU, Q., KHOTSENG, L. eta SU, H. 2020. «Sewage sludge-derived Fe- and N-containing porous carbon as efficient support for Pt catalyst with superior activity towards methanol electrooxidation». *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 9795-9802.
- [32] AHMAD, M., RAJAPAKSHA, A.U., LIM, J.E., ZHANG, M., BOLAN, N., MOHAN, D., VITHANAGE, M., LEE, S.S. eta OK, Y.S. 2014. «Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review». *Chemosphere*, **99**, 19-33.
- [33] CHANAKA UDAYANGA, W.D., VEKSHA, A., GIANNIS, A. eta LIM, T.T. 2019. «Pyrolysis derived char from municipal and industrial sludge: Impact of organic decomposition and inorganic accumulation on the fuel characteristics of char». *Waste Management*, **83**, 131-141.
- [34] TONG, S., ZHANG, S., YIN, H., WANG, J. eta CHEN, M. 2021. «Study on co-hydrothermal treatment combined with pyrolysis of rice straw/sewage sludge: Biochar properties and heavy metals behavior». *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **155**, 105074.