

Bioiragazketaren lehenengo urratsak eta garapena

G. Gallastegui¹, A. Elías¹, N. Rojo¹, L. Gurtubay¹,
G. Ibarra-Berastegi², A. Barona^{1*}

¹Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumen Saila.
Ingeniaritza Goi-Eskola Teknikoa. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

²Ingeniaritza Nuklearra eta Jariakinen Mekanika Saila.
Ingeniaritza Goi-Eskola Teknikoa. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

*astrid.barona@ehu.es

Jasoa: 2013-03-06

Onartua: 2013-04-08

Laburpena: Industria-jardueren ondorioz isuritako kutsatzaile toxikoek (besteak beste kiratsa dutenek) arazo larriak sortzen dituzte, bai ingurugiroan eta bai gizakien osasunean ere. Hori dela eta, gero eta zorrotzagoak dira nazioarteko legeak, eta airera igorritako kutsatzaileen kantitatea analisi bidez gero eta zehatzago neur daitekeenez, industriek inbertsioak egin behar izan dituzte airearen tratamendurako sistemak hobetzeko. Horren ondorioz, bioiragazketa bezalako bioprozesuek arrakasta handia lortu dute gas-korronteen garbiketean. Gaur egun, bioiragazketa teknologiako aukera frogatua da herri garatuetan; gainera, garabidean dauden herrietarako ere teknologia merkea da.

Hasieran, kiratsak sortutako arazoak ekiditeko soilik erabiltzen bazen ere, gaur egun beste hainbat industriatara ere hedatu da bioiragazketa, eta kutsatzaile ugari tratatzeko balio du.

Mikroorganismoek molekula kutsatzaileak degradatzeko duten ahalmenean datza bioiragazketa. Sistema horretan, gasen korrante kutsatua ohandze finkoan zehar igarorazten da, eta ohandze solido horretan itsatsita dagoen biomasak biodegradatu egiten ditu kutsatzaileak.

Lan honetan zehar, bioteknologia horren lehenengo urratsak, gaurko egoerara heldu arte izan duen garapena eta etorkizuneko erabilera deskribatuko dira.

Hitz gakoak: Bioiragazketa; airearen tratamendua; kiratsaren kontrola.

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) and odorous compounds emitted from many industries are of great concern for human and environmental health. The demand for air pollution control systems to provide nuisance-free breathable air and stricter environmental legislations have forced polluting industries to invest in air treatment technologies. As a consequence, affordable biological treatment techniques like biofiltration have gained noticeable popularity in the last decades. It has become a reliable option in developed countries and an affordable alternative in the emerging ones.

Although the original application of biofiltration was devoted to solve odour problems, eventually the number of successful applications has increased so far and, nowadays this technology is being used to biodegrade a very wide range of industrial pollutants from diverse sources.

The principles of biofiltration are quite simple. It involves feeding polluted air through a filter bed colonized by biomass capable of mineralizing (biodegrading) the pollutants. Clean air is thus released from the bioreactor into the atmosphere.

Thereby, this article describes the evolution and technical development of biofiltration from its start in 1923 until the current status.

Keywords: biofiltration; air treatment; odor control.

1. SARRERA

Degradazio biologikoa edo biodegradazioa gertakari naturala da, eta mikroorganismoen aktibitatearen ondorioz gertatzen den konposatu organikoen zein ezorganikoen deskonposizioan datza.

Zehazki, bioiragazketa deritzon prozesua gas egoeran dauden kutsatzailen biodegradazioan datza. Gasen korrante kutsatua ohantze finkoan zehar igaroarazten da, eta ohantze solido horretan itsatsita dagoen biomasak biodegradatzen ditu kutsatzaileak.

Ohantzearen materiala (euskarria) oso garrantzitsua da, mikroorganismoak hazi, garatu eta ugaltzeko «bizitokia» delako. Egun, euskarria hainbat materialez osatuta egon daiteke. Adibidez, material organikoen artean oso arruntak dira konposta, zohikatza eta enbor-azala. Badira era berean ezorganikoak, hala nola zeramika porotsua, perlita edo poliuretanozko kuboak.

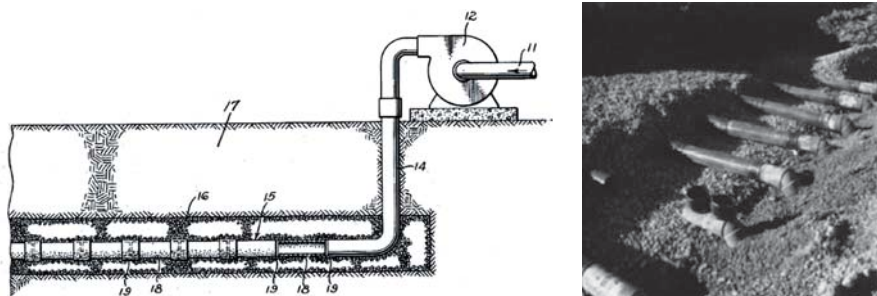
Dena den, bioiragazketa gizartean eta industrian finkatzeko eman ziren lehenengo urratsak oso motelak izan ziren, eta zenbait hamarkada igaro behar izan dira, teknologia hau erabat onartua izan arte eta industrian aplikatua izan arte. Beraz, XX. mendearen hasieran lehenengo iragazki biologikoa asmatu zenetik gaur egungo egoerara heldu arte bioiragazketak izan duen garapena deskribatuko da artikuluko honetan zehar.

2. HASIERAKO URRATSAK

Bach izeneko zientzialari alemaniarra izan zen bioiragazketaren aitzindaria. Berak proposatu zuen lehenengo iragazki biologikoa 1923an, hondakin-uren araztegietan igorritako hidrogeno sulfuroaren isurtzeak tratatzeko.

Dena den, 1950eko hamarkada arte ez zen bioiragazkien eraginkortasuna frogatu. Hala, lurzoruzko ohantzeek osaturiko lehenengo bioiragazkiak 1953an instalatu ziren Estatu Batuetan, saneamendu-sareko usainek eragin-dako eragozpenak ekiditeko (zehazki, Kaliforniako Belmont Shoreko arazte-

gian instalatu ziren). Urte batzuk beranduago, 1957an, instalazioaren egileak, Richard Pomeroyk, patentatu egin zuen sistema [1]. 1. irudian erakusten dira lehenengo diseinuaren eskema patentatua eta jatorrizko argazkia.



1. irudia. 1953an United States Patent Office delakoan aurkezturiko lehenengo bioiragazkiaren jatorrizko eskema (ezkerrekoa). Garai hartako instalazioaren argazkia (eskuinekoa).

Diseinu horretan, aire nardagarria tutuerietan zehar banatzen zen ponparen bidez. Banaketa-hodiak homogeneoki igaroarazten zuen gasa lurzori irazkorreara. Kasu horretan, euskarria buztin-lurra zen, eta Pasadenako (Kalifornia) mendi-magalean eskuratu zen. Ohantze horren biomasa gauza zen azido isobalerikoz, skatolez eta fenolez osaturiko gas-nahastea iragazteko, eta irteeran ez ei zen somatzen inolako usainik. Dena den, Pomeroy jauren arabera, azken baieztapen hori ez zen inolako neurketa kuantitatiboan oinarritu, eta langileen zein instalazio arduradunen usainaren hautemategaitasunean oinarritua zegoen.

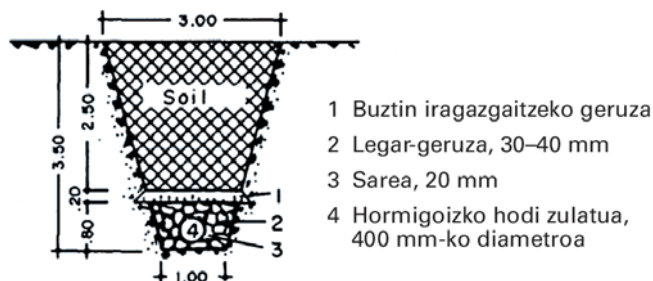
Beranduago, 1964an, Mercer Island (Washington) uhartean, era arrakastatsuan egokitu ziren antzeko iragazki biologikoak 14 ponpatze-estaziotan, inolako mantentze-lanik gabe [2]. Hasierako instalazio horien eraginkortasuna onartu zen arren, hurrengo hamarkadetan (1970eko eta 1980eko hamarkadetan) erabat bazterturik geratu zen bioteknologia hau Ipar Ameriketean. Adibide gisa, 1972tik 1973ra, kiratsaren tratamenduari buruzko zientzia-aldizkarietako artikulua nagusiek ez zituzten sistema biologiko hauek aintzat hartu [3, 4]. Funtsen, errausketa termikoa, oxidazio katalitikoa, gas-garbiketeta hezea, ozonizazioa eta adsortzioa baino ez ziren bultzatu garai hartan.

Teknikaren hasierako etenaldiaren erantzule nagusiak honako hauek izan ziren: orduko bioiragazkiak kokatzeko lur-eremu handia behar zuten, gobernuek utzikeria handia izan zuten aire kutsatuaren arazoa konpontzeko unean, eta «if it's cheaper, it can't be any good» pentsamendua oso zabaldua zegoen. Leson eta Winer zientzialarien arabera, 1991. urtera arte

50 iragazki biologiko inguru baino ez zebiltzan jardunean Estatu Batuetan eta Kanadan [5]. Boswellek 2009. urtean egindako zenbaketaren arabera, 75-100 iragazki biologiko inguru baino ez zeuden abian Ipar Ameriketan industriako aire-isurtzeak tratatzeko, eta haietako gehienak azken 15 urteetan instalatu ziren [6].

Hala eta guztiz ere, bioiragazketak Europan izan zuen garapena erabat ezberdina izan zen. Lehenengo lurrezko ohantze industrialak 1959. urtean instalatu zen Nuremberg hirian (Alemania), saneamendu-sareak isuritako kiratsa kontrolatzeko.

Geroago, 1960ko hamarkadatik aurrera, bioiragazkiak Europan erabiltzen hasi ziren kiratsaren eragozpenak konpontzeaz gain, airearen gaineko kutsatzaileak tratatzeko ere. Adibidez, Geneva-Villette hirian (Suitza), lur-ohantzezko sistema berri bat instalatu zen 1964. urtean, konpostajerako planta batetik isuritako $3000 \text{ m}^3_{\text{gas}} \text{ h}^{-1}$ tratatzeko (2. irudia) [7]. Instalazio hori 11 urte baino luzaingo aritu zen abian etengabe, eta uda aldean noiz-behinka baino ez zen ureztatzen, ohantzearen hezetasun maila neurri egokian mantentzeko [8]. Izan ere, kutsatzaileen deskonposizioa mikroorganismoen aktibitatean oinarritzen denez, eta mikroorganismoek bizirik irauteko ura behar dutenez, prozesu biologikoak egoki funtziona dezan nahitaezkoa da gutxienezko hezetasun maila ziurtatzea.



2. irudia. Geneva-Villette hirian 1964. urtean instalaturiko lur-ohantzezko bioiragazkian zeharkako ebakiduraren jatorrizko eskema [7].

Aurreko instalazioan oinarrituta, Frechen ingeniariak konpost helduz osaturiko iragazki biologikoa instalatu zuen Duisburg hirian (Alemania) 1967. urtean, oiloen hondakinen konpostaje mekanikoan isuritako airearen kutsadura tratatzeko asmoz. Lantegi horretan muntatu ziren lehenengo aldiz bi danbor birakari konposta errazago ekoizteko (3a. irudia) [9], baina tontor organiko freskoak aire librean pilatzen zirenez, kirats jasanezina zegoen. Izan ere, enpresa hori 1957. urtean sortu zen, eta, konpostea ekoizten

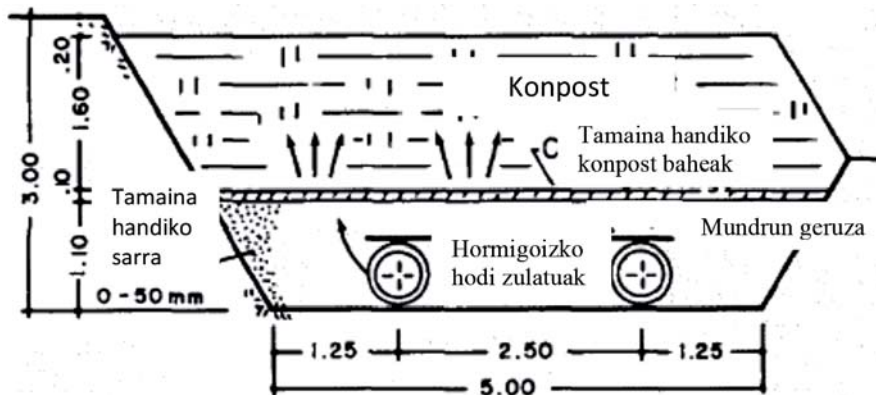
hasi zen hasierako unetik, arazo handiak sortu zituen bere ingurunean, sortutako kiratsa zela eta. Neue Ruhr Zeitung (NRZ) egunkarian argitaratu ziren lantegiaren inguruko auzokideen kezak (3b. irudia).

Kiratsa kentzeko bioiragazketaren bidezko tratamenduak erabili baino lehenago, instalazioaren aktibitateak eztabaida gogorak sortu zituen, eta enpresaren etorkizuna kolokan egon zen (3c. irudia) [10].



3. irudia. Oiloen hondakinen konpostaje mekanikoa egiteko lantegiaren barrua (a); Lantegiak Duisburg hirian eragindako arazoak, 1964. urtean komunikabideetan argitaratuak. Albistearen izenburua: «Huckingen hiriaren biztanleak sutan daude: Kiratsa!»; Azpititua: «Konpostaje-enpresak usain txarra sortzen du. Hiriak lagundu nahi du» (b); Westdeutsche Allgemeine Zeitung (WAZ) egunkarian plazaraturiko gatazka. Albistearen titulua «Kiratsaren arrastoa jarraitu!»; Azpititua: «Konpostaje-enpresa batek hiru urte daramatza Duisburg hegoaldeko biztanleak izorratzen» (c) [9, 10].

Teknikariak konturatu ziren konpost helduaz beteriko ohandze horrek, abantaila nabarmenak zituela, lurrez osaturiko ohandzearen aldean; esaterako, bazituen berezko mikroorganismo kopuru handia eta airearen konduktibitate egokiagoa. Kasu horretan, bioiragazkiaren neurriak $40 \times 5 \times 1.6$ metro ziren, eta $16990 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ aire kutsatu tratatzeko gai zen, egoitza edo egonaldi denbora 30 segundo izanik (4. irudia). Kiratsa tratatzea lortu zen (edo gizakien usaimen-mugatik behera murriztea lortu zen), sistemaren



4. irudia. Duisburg hirian kokaturiko konpostezko ohantzedun bioiragazkian zeharkako eskema (jatorrizkoa) (1967) [8].

eraginkortasuna % 95–99 bitartekoa izan zen, eta desagertu egin ziren lantegitik 100 metro baino hurbilago bizi zen biztanleriaren keak.

Bioiragazketaren abantaila ekonomikoaz ere laster ohartu ziren industriaren arloko kudeatzaileak. Jaeger eta Jegerrek (1978) hondar-gasen emariak garbitzeko aukera tekniko guztiak aztertu zituzten, eta bioiragazketaren analisi eta konparaketa ekonomikoa aurkeztu zen lehenengo aldiz 1978. urtean (1. taula) [11].

1. taula. Konpostajerako lantegiek isuritako hondar-gasak tratatzeko teknologien kostu hurbildua, 1978. urtean [11].

Arazketa-metodoa	1000 m ³ gas tratatzeko kostua (€)**
Errekuntza*	4.65
Scrubbinga	2.15
Ozonoaren bidezko oxidazioa	2.15
Ikatz aktibozko adsortzioa (+ materialaren erregenerazioa)	0.77
Konpostezko bioiragazkailua	0.31

* Erregaiaren balioa baino ez.

** Kostu guztiak €-tan adierazi dira, jatorrizko monetatik aldatuta.

Gainera, urte askotan, Duisburg hiriko konpostajerako instalazioan ekoiztutako konpostaren zati handia beste bioiragazki batzuen ohantzea betetzeko saldu zen [10]. Beraz, hondakina izatetik merkatuko produktu ko-

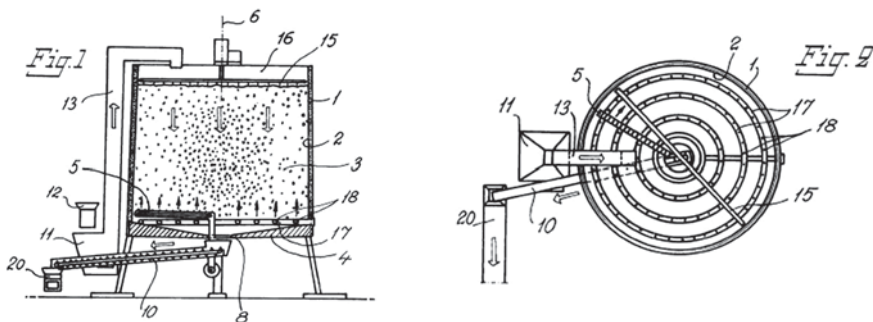
mertziala izatera iritsi zen konposta. Horren ostean, 1966-67 urteetatik aurrera, abereen ustiaketetan ere erabiltzen hasi ziren bioerreaktore horiek, hain zuzen ere Alemaniako txerri-korta batean lehenengo aldiz [12].

Orain arte aipaturiko erabilpen adibide horiek guztiak, «ingurumenaren babesaren» aldeko hazia izan ziren. Garai hartan ez zegoen inolako araudi-rik ingurumenaren kalitatea babesteko European, eta 1974. urtera arte itxaron behar izan zen Alemaniako Errepublika Federalean (AEF) «Federal Control of Pollution Act» delako legedia plazaratu zen arte.

Aldi berean, biztanle-dentsitatearen gorakadak behartuta 1978. urtean instalatu zen Holandako lehendabiziko bioiragazkia [13]. Bai gaur egun eta bai garai hartan, atmosferako kutsaduraren aurkako gatazkari dagokionez, Alemania eta Holanda dira Europako herrialde arduratsuenetarikoak. Espainiaren kasuan, iragazki biologikoak garatu eta merkaturatu zituzten lehenengo enpresak 90eko hamarkadan sortu ziren, eta lehenengo saiakuntza adierazgarriak Valentiako Komunitate Erkidegoan egin ziren, teknologia alemaniarrean oinarrituta.

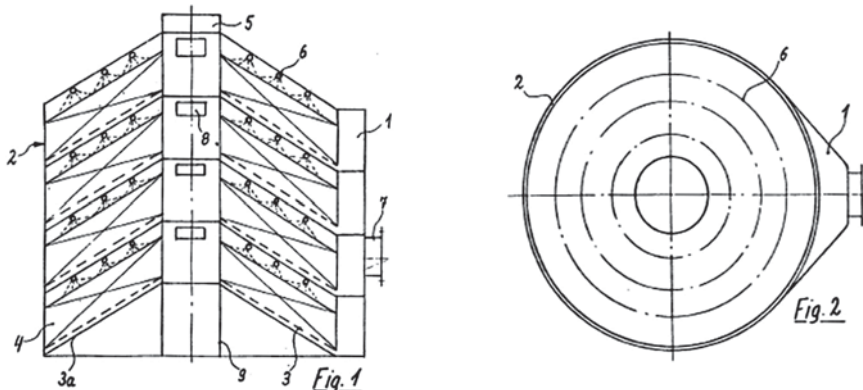
Hirurogeita hamarrek hamarkadaren bukaeran, teknologiako berrikuntza (edo hobekuntza) garrantzitsuak egin ziren. Hain zuzen, 1976 eta 1978. urteen artean, gaur egungo iragazki biologikoen diseinuan nagusi diren funtsezko oinarriak ezarri ziren, zenbait patenteren bidez. Industriako bioiragazki horiek itxiak ziren (beraz, eguraldiaren eraginik ez zuten jasaten) eta egitura trinkoa zuten.

Kneerek proposaturiko hobekuntzan, euskarri-material (konpost) freskoa etengabe elikatzen zen goiko aldetik, euskarri agortua beheko aldetik ateratzen zen, eta ohantze osoa irabiatu egiten zen etengabe (5. irudia) [14]. Patentaturiko sistema horretan, bentonita erabili zen, konpostarekin batera, material berriztatzaile moduan. Mikroorganismoen aktibitateko kaltegarriak izan daitezkeen konposatuak adsorbatzeko erabiltzen zen Bentonita.



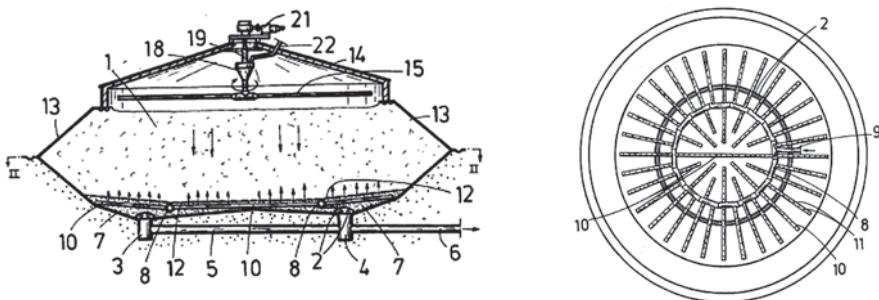
5. irudia. Kneerek proposaturiko bioiragazkiaren zeharkako ebakidura (ezkerrekoa) eta oinplanoa (eskuinekoa) (jatorrizko eskemak) [14].

Zantoppek proposaturiko berrikuntza lau plateraz osaturik zegoen. Plater horiek okertuta kokatzen ziren, eta euren gainean, euskarria (6. irudia) [15]. Plateretako ohantzearen hezetasun maila mantentzeko, ura gaineratzen zitzairen spray eran.



6. irudia. Zantoppek proposaturiko bioiragazkian zeharkako ebakidura (ezkerrekoa) eta oinplanoa (eskuinekoa) (jatorrizko irudiak) [15].

Geroago, Tapolak, zelulosa-sulfatoaren fabrikazio-prozesurako sistema berria proposatu zuen, gas kutsatua eta ur emaria aldi berean iragazteko (7. irudia) [16]. Ohantze gisa, zuhaitz koniferoen enbor azala erabiltzen, eta muntaia osoa behearen gainean (edo lurraren gainean) eta aire librean zegoen. Aurreko kasuen antzera, zulaturiko platerak erabili ziren euskarriari eusteko [16].



7. irudia. Tapolak proposaturiko bioiragazkiaren zeharkako ebakidura (ezkerrekoa) eta oinplanoa (eskuinekoa) (jatorrizko eskemak) [16].

Berrikuntza horiek guztiak egin ziren garaian, bioiragazki irekiak eta itxiak instalatzeko behar izan ziren gainazalak konparatu ziren.

Lehenengo kasuan, instalazioak behar izan zuen gainazala 3000 m^2 zen eta, sistema itxietan 8 m^2 baino ez, bioerreaktore itxia hobeto kontrolatzen baitzen [17]. Beraz, lekuaren murrizketa itzela egin zen (% 99a).

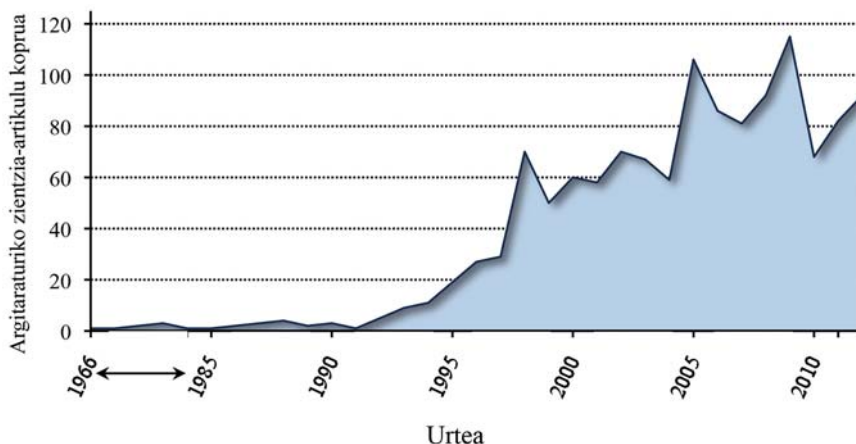
Konpostez osoturiko hasierako bioiragazkiek, $25 \text{ m}^3_{\text{aire}} \text{ m}^{-3}_{\text{ohantze}} \text{ h}^{-1}$ tratatzeko ahalmena zuten gehienez; baina ikerkuntzan oinarritutako berrikuntzak ezarri ondoren, $200 \text{ m}^3_{\text{aire}} \text{ m}^{-3}_{\text{ohantze}} \text{ h}^{-1}$ tratatzea lortu zen [18]. Ondorioz, 1980ko hamarkadatik aurrera, tratamendu fisiko-kimikoen aldean, bioiragazkiak lehiakorragoak zirela onartu zuten zientzialariek. Garai horretan abiatu ziren arlo horretako zenbait korporazio elkarte edo enpresa, eta horietariko batzuk lanean ari dira gaur egun ere. Adibidez, Bohn Biofilter (1986), DMT Environmental Technology (1987), Bioway, (1991), BioRem (1991) edo Bio*Reaction (1993).

3. BIOIRAGAZKETAREN GARAPENA, AZKEN URTEOTAN

Iragazki biologikoen inguruko nazioarteko lehenengo konferentziak, 1990eko hamarkadan egin ziren. Bioiragazkien «barne prozesua» ulertzeko lehenengo eredu matematikoak garatu ziren, mikrobiologiaren aurrerapen teknologiko itzelak lortu ziren, eta konposatu zenobiotiko zein errekalzitranteak bioiragaztea edo biodegradatzea lortu zen lehenengo aldiz. Horrez gain, kontrolerako parametroei buruzko informazio gehiago sortzen hasi ziren, diseinurako metodoak aplikatzen hasi ziren, ohantzerako material berriak proposatu ziren, eta moduluz osoturiko bioiragazkiak garatu ziren.

Bioiragazketari buruz argitaraturiko ikerkuntza-artikuluen kopuruak ere gorakada nabarmena izan zuen mundu osoan zehar. 8. irudian ikus daiteke zientzia eta teknologiaren arlo horretan argitaraturiko artikuluen batez besteko kopurua, 1966. urtetik egunera arte.

Beraz, 1995. urtetik aurrera, tratamendu biologikoetan oinarrituriko aire kutsatuaren iragazketa teknologia eraginkorren artean sailkatu zen, eta ohiko arloetan (hau da, konpostajerako lantegietan, saneamendu-sareetan, abere-ustiaketarako instalazioetan eta hondakinen tratamendurako instalazioetan) erabiltzeaz gain, beste hainbat industriatan ere instalatu da. Horietariko batzuk, hauexek dira besteak beste: industria kimikoa eta petrokimikoa, elikagaien eta egur-prozesamendurako industria, galdategiak, estalduren industria, sukaldeak, erretxina sintetikoak fabrikatzeko instalazioak, pintura eta tintak fabrikatzeko eta aplikatzeko instalazioak, hiltze-giak, tabakoaren, azukrearen eta kokoaren prozesatze-industriak, zaporeen



8. irudia. Bioiragazketari buruz argitaraturiko ikerkuntza artikuluen batez besteko kopurua, 1966. urtetik gaur egun arte (Tesiak eta Patenteak kontuan hartu gabe) (Egileen jatorrizko irudia).

eta perfumeen industria, kolaren eta gelatinaren produkzioarako industria eta industria farmazeutikoa.

Hala eta guztiz ere, aipagarria da hondakin-uren araztegieta izandako arrakasta. Adibidez, 2000. urtean, araztegien kiratsa tratatzeko Holandan abian jarritako instalazio guztien % 78k erabiltzen zituzten degradazioarako teknika biologikoak [19]. Eta Txinan, 2005. urtean, Beijing hiriburuko 20 uraztegietatik 5ek kirasdun gasak tratatzeko bioiragazkiak erabiltzen zituzten [20]. Jarraian, gaur egun munduan zehar eskala handian abian jarritako zenbait bioiragazkiren adibide bildu dira (2. taulan).

4. KONPOSATU BIODEGRADAGARRIAK

Biodegradagarritasunari dagokionez (edo mikroorganismoek konposatuak degradatzeko duten ahalmenari dagokionez), konposatu organiko bakunak (hau da, alkoholak, aldehidoak, zetonak eta aromatiko bakunak) dira biodegradatzeko erraztenak (3. taula). Amoniakoa (NH_3) eta hidrogeno sulfuroa (H_2S) bezalako konposatu inorganikoak ere erraz tratatzen dira. Biodegradatzeko zail samarrak direnen artean, hidrokarburu kloratuak eta hidrokarburu poliaromatikoak daude besteak beste.

Orain dela zenbait hamarkada, industriek isuritako hainbat kutsatzaile, biodegradaezintzat jo ziren, gizakiak sortukoak zirelako. Baina, azken urteetan egin den ikerketa eta aurrerapen mikrobiologikoei esker, gero eta handiagoa da biodegrada daitezkeen konposatuen multzoa.

2. taula. Gaur egun, munduan zehar, eskala handian abian jarri diren zenbait bioiragazkiren adibide.

Industria arloa	Tokia	Neurriak	Ohantzea	Trataturiko kutsatzaileak	Erref.
Hiriko hondakin solidoen konpostajea	Olot (Espainia)	980 m ³	1 m altuerako pinu azalezko geruza + 1 m altuerako konpostazko geruza	48 konposatu organiko lurrunkor; alkoholak, aldehidoak, hidrokarbuo aromatikokoak eta alifatikoak, esterrak, zetonak, terpenoak.	[21]
Hiriko hondakin solidoen konpostajea	Erroma (Italia)	1500 m ³	1 m altuerako zohikatuzko eta txilarrezko geruza	Etanola, limonenoa, azetona, toluenoa, bentzenoa, xilenoa.	[22]
Pinturagintza	Eugene (Oregon, EEUU)	3.7 m x 4.3 m x 4.9 m	BioAIRSphere™	Bentzenoa, toluenoa, xilenoa, etilbentzenoa, hexanoa, MEK, MIBK, azetona, zenbait alkohol eta sulfurik gabeko konposatu organiko klorodunak.	[23]
Inprimaturiko zirkuituetarako plaken prozesaketa	Toronto (Kanada)	12 m x 2.4 m x 2.4 m	BIOMIX™ izaera organikoazko modulu eta BIOSORBENS™ izaera ezorganikoazko moduluak	Glikoleterrak (PGMEA eta di-PGME) eta triaminak	[24]
Tabako-prozesaketa	Hangzhou (Txina)	280 m ³	2 m altuerako zuntzezko materiala	Amoniakoa eta nikotina.	[25]
Abere-ustiaketa	Tsukuba (Japon)	5.8 m x 8.0 m x 3.0 m	2.5 m altuerako ohantzea (harri zuntz, uretano, zeolita eta txita sinaurra)	Amoniakoa.	[26]
Oilasko-hazkuntzarako industria	Dębówka (Polonia)	2.0 m x 1.8 m x 1.8 m	Organikoa (konposta + zohikatza) eta organiko-ezorganiko (bentonita/hallosita + konposta + zohikatza)	H ₂ S, SO ₂ , CS ₂ , aminak, merkaptanoak, organo-sulfuroak.	[27]
Hondakin-uren araztegia	Cincinnati (EEUU)	7.5 m x 12.2 m x 1.8 m	1.8 m altuerako egur eta konpostazko geruza	H ₂ S	[28]

3. taula. Bioiragazketaren bidez degrada daitezkeen konposatuaren biodegradagarritasun maila erlatiboa (b.m.).

Konposatua	b.m.	Konposatua	b.m.
Hidrokarburu alifatikoak		Konposatu oxigenodunak	
<i>Hidrokarburu alifatiko aseak</i>		<i>Alkoholak</i>	
Metanoa	++/+	Metanola	+++
Propanoa	+++/>++	Etanola	+++
Pentanoa	+++/>++	Isopropanola	+++
Hexanoa	+++/>++	Butanola	+++
<i>Hidrokarburu alifatiko ez aseak</i>		<i>Eterrak</i>	
Etilenoa	+	Metil tert-butil eter (MTBE)	++
<i>Hidrokarburu alifatiko ziklikoak</i>		Dietileterra	
Ziklohexanoa	+	Dimetileterra	+
Hidrokarburu aromatikoak		Tetrahidrofuranoa	
Bentzenoa	++	<i>Aldehidoak</i>	
Toluenoa	+++	Formaldehidoa	+++
Xilenoa	+++	Azetaldehidoa	+++
Etilbentzenoa	+++	<i>Zetonak</i>	
Estirenoa	++	Azetona	++
Naftalenoa	++/>+	Metiletiletzona (MEK)	+++/>++
Hidrokarburu halogenatuak		Metilisopropilzetona (MIPK)	
Monoklorobentzenoa	++/>+	Metilisobutilzetona (MIBK)	
1,2-Diklorobentzenoa	+	<i>Azidoak</i>	
Mono, Di, Tri-klorometanoa	+	Azido butirikoa	
1,2-Dikloroetanoa	+	<i>Esterrak</i>	
Trikloroetilenoa (TCE)	+	Etil azetatoa	
Tetrakloroetilenoa	+	Metil metakrilatoa	
Terpenoak		<i>n</i> -Butil azetatoa (NBA)	
α -Pinenoa	++	Etil-3-etoxipropionatoa	
Limonenoa	+++/>++	<i>Fenolak</i>	
Konposatu nitrogenodunak		Fenola	
Amoniakoa	+++	Konposatu sufredunak	
Nitrogeno dioxidoa	+	Hidrogeno sulfuroa	
Nitrogeno oxidoa	++/>+	Sulfuro dimetiloa (DMS)	
Oxido nitrosoa	+	Disulfuro dimetiloa (DMDS)	
<i>Aminak</i>		Dietil disulfuroa (DEDS)	
Monometilamina (MMA)	+++	Metil merkaptanoa (MeSH)	
Trimetilamina (TMA)	++	Beste batzuk	
Dietilamina (DEA)	++	Siloxanoak	
<i>Nitrogeno heterozikloak</i>		Karbono monoxidoa	
Piridina	+++		
Akrilonitriloa	+++		

Biodegradagarritasun maila erlatiboa: +++ = Ona; ++ = Ertaina; + = Baxua

Mikroorganismoen aktibitatearen ondorioz ekotzitako produktuak edo metabolitoak oso ezberdinak dira, degradatu nahi den kutsatzailearen izaeraren arabera. Metabolito horiek metatu daitezkeen arren, eta ondorioz, kaltegarriak diren arren, % 100eko degradazioa lor daiteke. Karbonoa eta hidrogenoa baino ez dituzten konposatu organikoak tratatzen direnean, CO₂-a eta H₂O-a lortzen dira; konposatu horiek zuzenean isuri daitezke atmosferara. Halere, kloroa, sufrea edo/eta nitrogenoa duten konposatu lurrunkorak biodegradatzen direnean, sistemaren eraginkortasunerako kaltegarriak diren beste produktu batzuk ere lortzen dira (ohantzea azidotzen duen hidrogeno kloruroa, euskarriaren gainean hauspeatzen diren sulfatoak eta abar.) (4. taula).

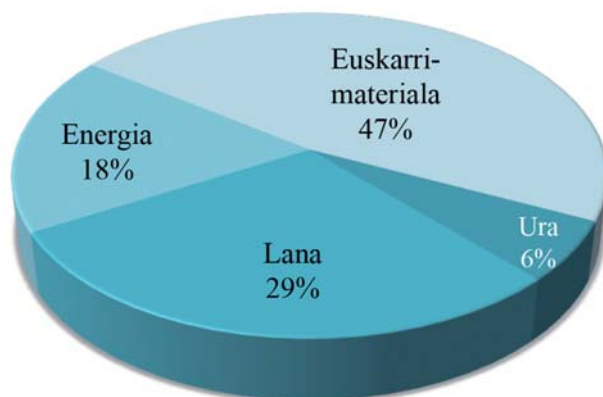
4. taula. Zenbait konposaturen degradazio biologikoren produktuak, bakterio erantzulearen izaera eta degradazioaren baldintzak.

Degradaturiko konposatua	Produktua	Bakterioaren izaera	Ingurune-baldintzak
C eta H baino ez dituzten konposatu organikoak	CO ₂ , H ₂ O	Kemioheterotrofikoak	Aerobikoa
Kloroa duten konposatu organikoak	HCl, CO ₂ , H ₂ O	Kemioheterotrofikoak	Aerobikoa
H ₂ S	S ⁰ , SO ₄ ⁻²	Sufre-oxidatzaileak	Aerobikoa
NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	Nitrifikatzaileak	Aerobikoa
NO ₃ ⁻	N ₂	Desnitrifikatzaileak	Anaerobikoa

5. MUNDUAN ZEHARREKO HEDAKUNTZA

Herrialde industrializatuetan eta garabidean dauden herrialdeetan hedakuntza ezberdina izan du bioiragazketak. Lehenengoetan, teknologia hori sendotuz joan da, kontrolerako sistemak asko hobetu direlako eta prozesuaren eraginkortasun maila handiagoa lortu delako azken hamarkadetan.

Garabidean dauden herrialdeetan izandako bultzadari dagokionez, ohantzea betetzeko materiala (euskarri-materiala) eskuragarri izatea eta uraren kontsumoa baxua izatea eragin handiko faktoreak izan dira. Izan ere, funtzionamendurako gastu garrantzitsuenetarikoa da ohantzerako materialaren kostua, erabileraz agortu egiten den material horren kantitate handia behar delako (9. irudia). Gainera, halabeharrez egin behar diren zenbait esku-lanen kostua ere guztiz loturik dago euskarri-materiala ordezkatzeko prozesuarekin.



9. irudia. Konpostez (75%) eta perlitaz (25%) osaturiko bioiragazkiaren funtzionamendurako gastuen banaketa hurbildua [29].

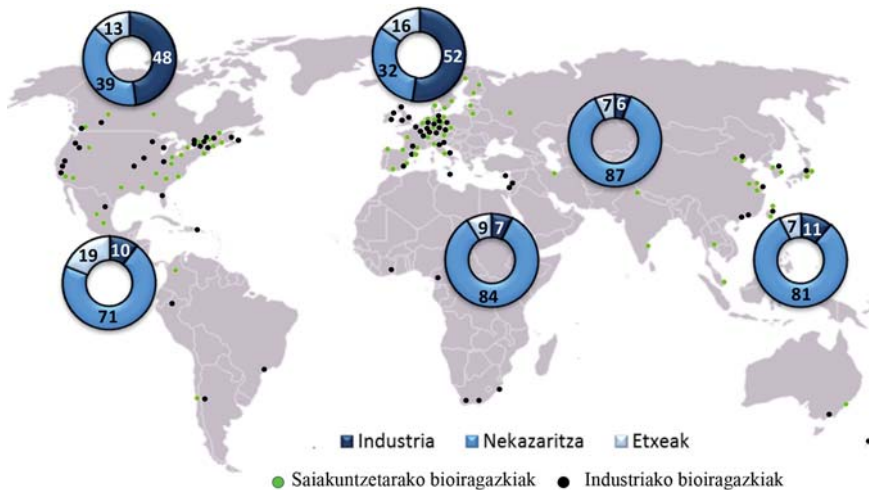
Garabidean dauden herrialdeetan nekazaritzaren eta abeltzaintzaren hondakin ugari daude, eta hauek dira, hain zuzen ere, ohantze moduan erabil daitezkeen etorkizuneko materialak.

Jarriaan, ikerkuntza saiakuntzetan edo instalazio pilotuetan erabili diren zenbait hautagai material laburbildu dira:

- Azukre-kanaberaren hondakinak [30-35]. Pisuzko osaera hau da: % 50 zelulosa, % 25 hemizelulosa eta % 25 lignina. Azukrearen industri erazketan sortzen den nekazaritzako hondakin hau Kubako eta Brasileko herrialdeetan ugaria da.
- Pneumatikoen kautxuzko zatiak [36-38]. Birziklaturiko kautxuzko zatiek ezaugarri fisiko eta kimiko egokiak izan ditzakete bioiragazkiaren ohantzea osatzeko.
- Kokozko zuntza [32, 39-41]. Herrialde tropikal askotan eskuragarri dagoen materiala da kokozko zuntza. Esate baterako, Brasilen 7000 tona ekoizten dira urtean, eta kantitate horretarik % 15-20 inguru errepide bazterretan edo kontrolik gabeko zabortegietan metatzen da. Materia organikoaren edukiera oso altua da, baina ura atxikitzeke ahalmena, ertaina.
- Fruitu oskolak; adibidez, kakao [42], intxaur arrunta [43], Makadamia intxaur [44] eta kakahuete oskolak erabiliz [45], zenbait saiakuntza arrakastatsu egin dira. Hego Ameriketara edo Hego-ekialdeko Asian hautabide erabilgarria eta merkea da.
- Bibliografian aurki daitezke azpiproduktu gehiago hala nola artelazkia [46], babarrun landareen zurtoina [47], arto burua eta beraren uz-

tondoa [48-50], karramarroen eta bibalbioen maskorra [51, 52], behi eta ahuntz gorotzez osaturiko konposta [53, 54] eta pinuen azal zatiak [55].

Bioiragazkien funtzionamendu egokirako behar den uraren kontsumoa baxua izateak erabateko garrantzia du. Garabidean dauden herrietan (adibidez Latinoamerika eta Karibea, Ekialdeko eta Hego-ekialdeko Asia eta Sahara azpiko Afrikan) kontsumitzen den uraren % 70etik gora nekazaritzan erabiltzen da (10. Irudia) [56]. Eskualde hauetan, ureztapen-zerbitzua eskuragarri izatea funtsezkoa da laborantza emankorra izateko, elikagaiak ziurtatzeko eta nekazari txikien bizimodua aurrera ateratzeko edo bizirik irauteko. Ondorioz, bioiragazketa gas kutsatuak tratatzeko teknologiak eskaintzen duen aukera erakargarria da, gizarte horientzako uraren funtsezko erabilerak erasaten ez baitira.



10. irudia. Uraren erabileraren banaketa (industria, nekazaritza eta etxeak, FAOtik hartua) [56] eta bioiragazkien kokapena munduan zehar.

Aurreko grafikoan ikusten denez, bioiragazkiak mundu osoan zehar instalatu dira, batez ere herrialde garatuetan; baina Txina eta India bezalako herrialdeetan teknologia hau ezartzeko grina handia dago; teknologia honetan oso faktore garrantzitsuak dira alde batetik, gas kutsatuak tratatzeko eraginkorra eta merkea izatea, eta bestetik, ur kontsumo baxua eta euskarri-materiala eskuragarri izatea dira.

6. ESKER ONAK

Euskal Herriko Unibertsitateko Ikerketa errektoreordetzaren prestakuntza-programari (Gorka Gallastegui emandako diru-laguntzari) eta GIU12/07 talde-proiektuari esker burutu da lan hau. Jose Ramon Etxebarria irakaslearen laguntza bereziki eskertu nahi da testu honen euskara zuzentzeagatik.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] POMEROY R.D. 1957. *De-odorizing of gas streams by the use of micro-biological growths*. Patent US2793096.
- [2] CARLSON D.A. eta LEISER C.P. 1966. «Soil beds for the control of sewage odors». *J. Water Polut. Control Fed.* **38** (5): 829-840.
- [3] TURK A., HARING R.C. eta OKEY, R.W. 1972. «Odor control technology». *Environ. Sci. Technol.* **6** (7): 602-607.
- [4] BETHEA R.M., MURTHY B.N. eta CAREY, D.F. 1973. «Odor controls for rendering plants». *Environ. Sci. Technol.* **7** (6): 504-510.
- [5] GERO L. eta WINER A.M. 1991. «Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions». *J. Air Waste Manage. Assoc.* **41** (8): 1045-1054.
- [6] BOSWELL J.T. 2009. «Biological control of industrial VOC emissions in North America - 20 years of evolution». In: *Proceedings of the 3rd International Congress on Biotechniques for Air Pollution Control*. Ed. P.N.L. Lens. pp. 9-10. Delft, The Netherlands. CRC Press.
- [7] DUPONT G. 1964. «La desodorisation des gas de fermentation des ordures menageres, dans les usines de compostage». Division de l'assainissement de department des travaux publics. Geneve, Suisse.
- [8] BOHN H.L. 1975. «Soil and compost filters of malodorous gases». *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* **25** (9): 953-955.
- [9] FRECHEN F.B. 1994. «Odour emissions of wastewater treatment plants - Recent german experiences». *Water Sci. Technol.* **30** (4): 35-46.
- [10] FRECHEN F.B. eta FRANKE W. 2009. «Biofiltration—from past to future—A scientific view». In: *Proceedings of the 3rd International Congress on Biotechniques for Air Pollution Control*. Ed. P.N.L. Lens. pp. 69-74. Delft, The Netherlands. CRC Press.
- [11] JAEGER B. eta JEGER J. 1978. «Geruchsbehaftung in Kompostwerken am Beispiel Heidelberg». *Muell und Abfall*, pp. 48-52. February 1978.
- [12] ZEISIG H.D. eta MUNCHEN T.U. 1987. «Experiences with the use of bio-filters to remove odours from piggeries and hen houses». In: *Volatile Emissions from Livestock Farming and Sewage Operations*. Eds. V.C. Nielsen, J.H. Voorburg and P.L'Hermite. pp. 209-216. New York, USA. Elsevier Applied Science Publishers.

- [13] VISSCHER K., CORNELISSE A.H. eta VAN LOHUIZEN C.J. 1979. «Stankbestrijding met een bodemfilter». *Polytechnisch Tijdschrift. Proces-techniek*. **34** (9): 575-579.
- [14] KNEER, F.X. 1976. «Apparatus for the removal of gaseous organic impurities from waste gases». Application number: CA19750235883 19750919. Priority number: DE19742445315 19740923. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=CA&NR=1080144A1&KC=A1&FT=D&ND=5&date=19800624&DB=EPODOC&locale=en_EP (2013 Ekainak 30).
- [15] ZANTOPP H. 1978. «Vorrichtung zum reinigen von gasen (Device for cleaning of gases)». Application and Priority number: DE19762652673 19761119. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?locale=en_EP&FT=D&CC=DE&DB=EPODOC&NR=2652673A1&date=19780524&ND=3&KC=A1 (2012 Ekainak 30).
- [16] TAPOLA E., STEN M. eta KOISTINEN O. 1978. «Biofilter». United States Patent 4086167. <http://www.freepatentsonline.com/4086167.pdf> (2013 Ekainak 30).
- [17] OTTENGRAF S.P.P. 1986. «Exhaust gas purification». *Biotechnol.* **8**: 425-452.
- [18] DETCHANAMURTHY S. eta GOSTOMSKI P.A. 2012. «Biofiltration for treating VOCs: an overview». *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **11**: 231-241.
- [19] STOWA Report 2000/3. 2000. Biologische luchtzuiveringssystemen op rwzi's. Hageman Fulfilment, Zwijndrecht.
- [20] VAN GROENESTIJN J.W. 2005. «Biotechniques for air pollution control: past, present and future trends». In: *Proceedings of the 1st International Congress on Biotechniques for Air Pollution Control*. Ed. Kennes, C. and Veiga, M.C. pp. 3-12. A Coruña, Spain.
- [21] PRENAFETA-BOLDÚ F.X., ORTEGA O., ARIMANY M. eta CANALIAS F. 2012. «Assessment of process limiting factors during the biofiltration of odorous VOCs in a full-scale composting plant». *Compost Sci. Util.* **20** (2): 73-78.
- [22] PHILLIPS I. 2009. «VOC control, nature's way». *Pollut. Eng.* **22**: 22-25.
- [23] SWIFT C.S. 2002. «Results of full-scale installation and comparison of biofilter operations». In *Proceedings of A&WMA's 95th Annual Meeting and Exhibition*. Baltimore, MD, June 23-27, 2002. A&WMA: Pittsburgh; Paper 43375.
- [24] SHAREEFDEEN Z., HERNER B.P., WEBB D., POLENEK S. eta WILSON S. 2002. «Removing volatile organic compound (VOC) emissions from a printed circuit board manufacturing facility using pilot- and commercial-scale biofilters». *Environ. Prog.* **21** (3): 196-201.
- [25] SHU M. eta CEN P.L. 2007. «Full-scale treatment of odorous emissions from burley tobacco processing plant». *J. Zhejiang Univ.* **41** (8): 1417-1420.
- [26] YASUDA Y., KURODA K., FUKUMOTO Y., HANAJIMA D. eta SUZUKI K. 2009. «Evaluation of full-scale biofilter with rockwool mixture treating ammonia gas from livestock manure composting». *Bioresour. Technol.* **100**: 1568-1572.

- [27] TYMCZYNA L., CHMIELOWIEC-KORZENIOWSKA A., DRABIK A., SKÓRSKA C., SITKOWSKA J., CHOLEWA G. eta DUTKIEWICZ J. 2007. «Efficacy of a novel biofilter in hatchery sanitation: II. Removal of odorogenous pollutants». *Ann. Agric. Environ. Med.* **14**: 151-157.
- [28] ZHUANG L., KEENER T.C. eta SIDDIGUI K.F. 2001. «Long-Term evaluation of an industrial-scale biofilter for odor control at a large metropolitan wastewater treatment plant». *Environ. Prog.* **20** (4): 212-218.
- [29] ESTRADA J.M., KRAAKMAN N.J., LEBRERO R. eta MUÑOZ R. 2012. «A sensitivity analysis of process design parameters, commodity prices and robustness on the economics of odour abatement technologies». *Biotechnol. Adv.* **30** (6): 1354-1363.
- [30] JOVER J., RAMIREZ M., RODRIGUEZ I., GOMEZ J.M. eta CANTERO D. 2012. «Strategies for pH control in a biofilter packed with sugarcane bagasse for hydrogen sulfide removal». *J. Environ. Sci. Health. Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* **47** (7): 990-996.
- [31] TRETO H., RODRÍGUEZ I., JOVER J. eta VAN LANGENHOVE H. 2011. «Remoción de sulfuro de dimetilo mediante biofiltración con bagazo de caña inoculado con *Hyphomicrobium VS*». *Afinidad.* **68** (553): 221-225.
- [32] RODRIGUES J.L., SADER L.T., DAMIANOVIC M.H., FORESTI E. eta SILVA E.L. 2010. «Performance evaluation of packing materials in the removal of hydrogen sulphide in gas-phase biofilters: Polyurethane foam, sugarcane bagasse, and coconut fibre». *Chem. Eng. J.* **158** (3): 441-450.
- [33] ZILLI M., DAFFONCHIO D., DI FELICE R., GIORDANI M. eta CONVERTI A. 2004. «Treatment of benzene-contaminated airstreams in laboratory-scale biofilters packed with raw and sieved sugarcane bagasse and with peat». *Biodegradation.* **15** (2): 87-96.
- [34] SENE L., CONVERTI A., FELIPE M.G.A. eta ZILLI M. 2002. «Sugarcane bagasse as alternative packing material for biofiltration of benzene polluted gaseous streams: a preliminary study». *Bioresour. Technol.* **83** (2): 153-157.
- [35] SARAVANAN V. eta RAJAMOHAN N. 2009. «Treatment of xylene polluted air using press mud-based biofilter». *J. Hazard. Mater.* **162**: 981-988.
- [36] PARK J., EVANS E.A. eta ELLIS T.G. 2011. «Development of a biofilter with tire-derived rubber particle media for hydrogen sulfide odor removal». *Water, Air, Soil Pollut.* **215**: 145-153.
- [37] ÁLVAREZ-HORNOS F.J., IZQUIERDO M., MARTÍNEZ-SORIA V., PENYA-ROJA J.M., SEMPERE F. eta GABALDÓN C. 2011. «Influence of ground tire rubber on the transient loading response of a peat biofilter». *J. Environ. Manage.* **92**: 1978-1985.
- [38] SOARES M., WOICIECHOWSKI A.L., KOZLIAK E.I., PACA J. eta SOCOL R. 2012. «Biofiltration of gasoline and ethanol-amended gasoline vapors». *J. Environ. Sci. Health. Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ.* **47** (7): 1008-1016.
- [39] DORADO A.D., LAFUENTE F.J., GABRIEL D. eta GAMISANS X. 2010. «A comparative study based on physical characteristics of suitable packing materials in biofiltration». *Environ. Technol.* **31** (2): 193-204.

- [40] KRISHNAKUMAR B., HIMA A.M. eta HARIDAS A. 2007. «Biofiltration of toluene-contaminated air using an agro by-product-based filter bed». *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **74**: 215-220.
- [41] CHETPATTANANONNDH P., NITIPAVACHON Y. eta BUNYAKAN C. 2005. «Biofiltration of air contaminated with methanol and toluene». *Songklanakarín J. Sci. Technol.* **27**: 761-773.
- [42] TURCOTTE V., BIAIS J.F., MERCIER G. eta DROGUI P. 2009. «Utilisation des écaillés de cacao comme support de biofiltration pour le traitement d'effluents de l'industrie agro-alimentaire». *Can. J. Civ. Eng.* **36** (6): 1059-1070.
- [43] ZARE H., NAJAFPOUR G., RAHIMNEJAD M., TARDAST A. eta GILANI S. 2012. «Biofiltration of ethyl acetate by *Pseudomonas putida* immobilized on walnut shell». *Bioresour. Technol.* **123**: 419-423.
- [44] VOLCKAERT D., ALVAREZ-HORNOS F.J., HEYNDERICKX P.M. eta VAN LANGENHOVE H. 2012. «Ethylbenzene removal under mesophilic conditions in a biofilter with *Macadamia ternifolia* nutshells as a carrier material». *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **88** (1): 81-87.
- [45] RAMIREZ-LOPEZ E.M., CORONA-HERNANDEZ J., AVELAR-GONZALEZ F.J., OMIL F. eta THALASSO F. 2010. «Biofiltration of methanol in an organic biofilter using peanut shells as medium». *Bioresour. Technol.* **101**, 87-91.
- [46] PARK B.G., SHIN W.S. eta CHUNG J.S. 2009. «Simultaneous biofiltration of H₂S, NH₃ and toluene using cork as a packing material». *Korean J. Chem. Eng.* **26** (1): 79-85.
- [47] SINGH R.S., AGNIHOTRI S.S. eta UPADHYAY S.N. 2006. «Removal of toluene vapour using agro-waste as biofilter media». *Bioresour. Technol.* **97**: 2296-2301.
- [48] KUMAR M.A. eta CHANDRAJIT B. 2012. «Biodegradation of waste gas containing benzene by using corn-cob based biofilter». *Res. J. Chem. Sci.* **2** (6): 60-65.
- [49] RAMIREZ LOPEZ E.M., CORONA-HERNÁNDEZ J., DENDOOVEN L., RANGEL P. eta THALASSO F. 2003. «Characterization of five agricultural by-products as potential biofilter carriers». *Bioresour. Technol.* **88**: 259-263.
- [50] SINGH R.S., RAI B.N. eta UPADHYAY S.N. 2006. «Performance evaluation of an agro wastebased biofilter treating toluene vapours». *Environ. Technol.* **27**: 349-357.
- [51] KWON H.M. eta YEOM S.H. 2009. «Design of a biofilter packed with crab shell and operation of the biofilter fed with leaf mold solution as a nutrient». *Biotechnol. Bioproc. Eng.* **14** (2): 248-255.
- [52] MASSOUDINEJAD M.R., MANSHOURI M., KHATIBI M., ADIBZADEH A. eta AMINI H. 2008. «Hydrogen sulfide removal by *Thiobacillus thioparus* bacteria on seashell bed biofilters». *Pak. J. Biol. Sci.* **11** (6): 920-924.
- [53] GIRI B.S., JUWARKAR A.A., SATPUTE D.B., MUDLIAR S.N. eta PANDEY R.A. 2012. «Isolation and characterization of dimethyl sulfide (DMS)

- degrading bacteria from soil and biofilter treating waste gas containing DMS from the laboratory and pulp and paper industry». *Appl. Biochem. Biotechnol.* **167** (6): 1744-1752.
- [54] HERI H., TANIA S.U. eta NASIKIN M. 2012. «N₂O reduction using goat and cow manure-based compost as biofilter medium». *Adv. Mater. Res.* **518-523**: 5075-5085.
- [55] AKDENIZ N., JANNI K.A. eta SALNIKOV I.A. 2011. «Biofilter performance of pine nuggets and lava rock as media». *Bioresour. Technol.* **102** (8): 4974-4980.
- [56] FAO. 2007. Water at a glance. <http://www.fao.org/nr/water/docs/waterataglance.pdf> (2013 Martxoak 29).