Ekaia, 2026, 49, 257-273
https://doi.org/10.1387/ekaia.27570

ekaia
ZIENTZIA eta TEKNOLOGIA ALDIZKARIA

ISSN 0214-9001 – eISSN 2444-3255

Paperean oinarritutako gailu analitikoak: analisi azkarrak, merkeak eta eramangarriak

(Paper-based analytical devices: fast, low-cost and portable measurements)

*Irati Berasarte**[1,2], *Gorka Albizu*[1], *Miren Ostra*[1], *Maider Vidal*[1]

[1] Kimika Analitikoa, Kimika Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU)
[2] Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumenaren Ingeniaritza Saila, Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU)

LABURPENA: Artikulu honek paperean oinarritutako gailu analitikoen (PAD) garapena eta potentzialа aztertzen du, testuinguru argi batekin: analisi kimikoak arinago, merkeago eta eramangarriago bihurtzea. Zientziak geroz eta gehiago eskatzen ditu tresna sinple baina eraginkorrak, batez ere baliabide mugatuak dituzten inguruetan. Hori dela eta, papera —material jasangarri eta moldakorra izanik— tresna ezin hobea da helburu horietarako. Lan honetan azaldu da PADak nola fabrikatzen diren eta nola uztartzen diren detekzio-metodo berrienekin, irudi digitalen analisian zentratuz. Teknikoki sinpleak izanik ere, literaturan proposatutako aplikazioen berrikusketa bibliografikoa egin da: diagnostiko klinikoak, elikagaien segurtasuna, uraren kalitatea edo kutsatzaileen detekzioa, besteak beste. Gailu horiek, merkeak, jasangarriak eta erabilerrazak direnez, analisi kimikoa demokratizatzeko bide berriak irekitzen dituzte.

GAKO-HITZAK: paperezko gailuak, irudi digitalen analisia, kolorimetria, bertatik bertarako neurketak.

ABSTRACT: *This work examines the development and potential of paper-based analytical devices (PADs), with a clear context: making chemical analysis faster, cheaper and more portable. Science increasingly requires simple but effective tools, especially in resource-limited environments. For this reason, paper —being sustainable and adaptable— paper is an ideal material for these purposes. An exhaustive search was performed on how PADs are manufactured and combined with the latest detection methods, focusing on digital image analysis. Despite their technical simplicity, a review of the different applications proposed in the literature was carried out: clinical diagnostics, food safety, water quality or pollutant detection, among others. The fact that these devices are cheap, sustainable and easy to use opens up new avenues for the democratization of chemical analysis.*

KEYWORDS: paper devices, digital image analysis, colorimetry, onsite applications.

* ***Harremanetan jartzeko/Corresponding author:*** Irati Berasarte, Kimika Analitikoa, Kimika Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea EHU. https://orcid.org/0000-0002-9235-8477, irati.berasarte@ehu.eus

Nola aipatu/How to cite: Gabirondo, Berasarte, Irati; Albizu, Gorka; Ostra, Miren; Vidal, Maider (2026). «Paperean oinarritutako gailu analitikoak: analisi azkarrak, merkeak eta eramangarriak», *Ekaia*, 49, 2026, DOI: https://doi.org/10.1387/ekaia.27570

Jasoa: maiatzak 29, 2025; Onartua: otsailak 19, 2026

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

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

1. **PAPEREAN OINARRITUTAKO GAILU ANALITIKOAK**

Papera jatorri jasangarria duen eta biodegradagarria den material fina da, eta, beraz, produktu garbi bat da. Zelulosa-zuntzez osatuta dagoenez, likidoak kapilaritate bidez garraiatzeko gaitasuna dauka [1]. Gainera, egitura horrek erreaktibo kimikoak gordetzeko, gainazala funtzionalizatzeko eta aldatzeko aukera ematen dio [2]. Beraren potentziala dela eta, paperean oinarritutako euskarriak kimikan, biologian, medikuntzan, bioteknologian eta elikagaien segurtasunean erabili dira [3]. Bestalde, haren kolore zuriagatik neurketa kolorimetrikoak egiteko euskarri bikaina da [4].

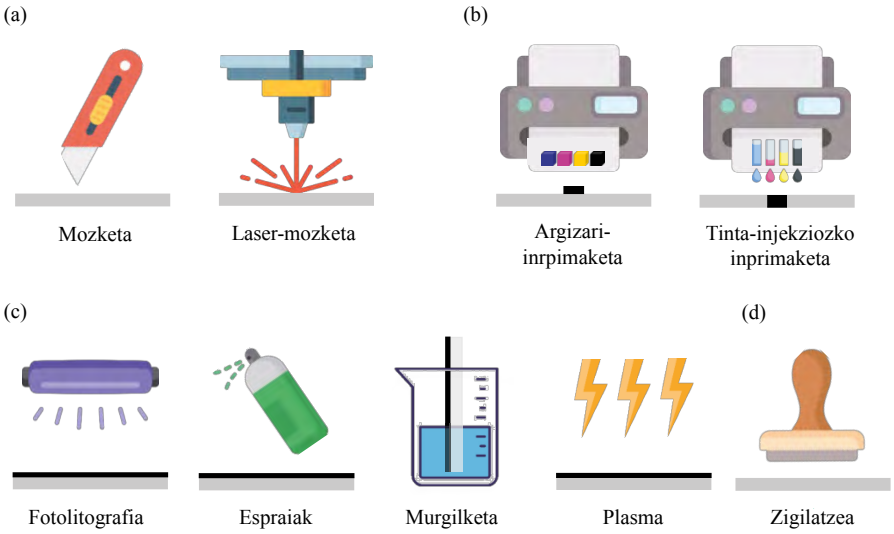
Esan daiteke K.o. 23. urtean papiro batean egindako burdinaren determinazio kolorimetrikoa izan zela paperean oinarritutako lehen aplikazio zientifikoa. Ondoren, beste aplikazio ugari eduki ditu. Hala nola, XIX. mendearen hasieran, Gay-Lussac ikertzaileak tornasoletan blaitutako papera erabili zuen azidotasuna eta basikotasuna determinatzeko; 1814an kloruroak analizatu ziren almidoia eta ioduroa erabiliz, eta 1850ean azukreak detektatu ziren [2]. XX. mendean paperaren aplikazio sofistikatuagoak eta zehatzagoak egiten hasi ziren. Adibidez, Feigl eta Stern-ek paperean oinarritutako lehenengo mikroanalisiak burutu zituzten (1917), Yagodak lehen paperezko gailu mikrofluidikoa aurkeztu zuen (1937), Martin eta lankideek papera erabili zuten banatze kromatografikoa egiteko (1944), eta Muller eta Clegg-ek parafinaz baliatuz paperean muga hidrofobikoak sortu zituzten (1949) [5]. XXI. mendean, zehazki 2007. urtean, Whitesides eta lankideek material berri bat erabili zuten, argiarekiko sentikorra, paperean muga hidrofobiko bat sortzeko aukera ematen zuena. Horrela, papera euskarri interesgarri gisa berreskuratzea lortu zen, haren erabilera suspertuz [6].

Orokorrean, PAD (ingelesetik, *paper-based analytical device*, paperean oinarritutako gailu analitikoa) terminoak gailu analitiko bati egiten dio erreferentzia, zeinetan papera den diseinuaren osagai nagusia eta haren propietateak indartzen diren. Propietate horien artean, kapilaritatea, absortzio- eta adsortzio-gaitasunak eta fabrikazio-kostu baxua daude [7]. Azken urteetan hainbat PAD mota proposatu eta erabili dira, eta bakoitzak PAD akronimoari siglaren bat gehituta izendatu dira, hala nola, gailu mikrofluidikoak (μPAD, *microfluidic paper-based analytical device*), kolorimetrikoak (CPAD, *colorimetric paper-based analytical device*) eta elektrokimikoak (PED, *paper-based electrochemical device*).

1.1. **Paperezko gailuen fabrikazioa**

Lehen urratsa PADen fabrikazioa da, eta bi talde nagusitan bana daiteke. Alde batetik, paperari nahi den forma ematean oinarritzen diren metodoak daude, eta horretarako kuterra, guraizeak edo labanak erabil daitezke.

Bilatzen den forma bereizmen handiagoarekin lortzeko gailu garestiagoak ere badaude, hala nola CO_2 laserrak [8]. Bestalde, muga hidrofobikoak zehaztean oinarritzen diren metodoak daude. Kasu horretan, paperaren poroak blokeatzen dira. Horretarako material ezberdinak erabil daitezke: argizaria, polidimetilsiloxanoa (PDMS), titanio dioxidoa, erretxina akrilikoak edo poliestirenoa. Material horiek paperean finkatzeko metodo erabilienak zigilatzea, inprimaketa (argizaria, tinta, tonerra) eta txantiloi bidezko diseinuak dira [9]. Metodoetako batzuk 1. irudian aurkeztu dira.



1. irudia. PADak fabrikatzeko hainbat metodoren irudikapen eskematikoa. (a) Forma ematea muga fisikoak sortzeko, (b) inprimaketa-metodoak, (c) txantiloietan oinarritutako diseinuak muga hidrofobikoak sortzeko, eta (d) zigilatzea.

Gailua fabrikatzeko metodoaren aukeraketan hainbat aldagai hartu behar dira kontuan: materialaren eskakizunak, ekipoaren erabilgarritasunak, ekoizpenaren helburua eta lortu nahi den gailuaren bereizmena. Horregatik guztiagatik, gaur egun gehien erabiltzen diren fabrikazio-metodoak argizari-inprimaketa eta tinta-injekziozko inprimaketak dira. Izan ere, kostu baxua dute, ez da txantiloirik behar, fabrikazio-protokoloa azkarra da, ekoizpena eskalagarria izan daiteke, bereizmena ona da, eta erreproduzigarritasuna altua [3]. 1. taulan fabrikazio-metodoen arteko konparazioa eta bakoitzaren abantailak eta desabantailak biltzen dira.

1. taula. Literaturan aurkitutako paperezko gailuen fabrikazio-metodo nagusien arteko konparazioa, kontuan izanik behar diren produktu kimiko eta ekipamenduak, bereizmena, abantailak eta eragozpenak.

Metodoa	Ekipamendua	Bereizmena	Abantailak	Desabantailak	Erref.
Mozketa	X-Y *plotter*-a edo CO_2 laserra	Altua	Fabrikazio eskalagarria formatu konplexuetan	Ekipamendu espezifikoa, material osagarriak kutsadura saihesteko, ke kaltegarriak (laser mozketa)	[10, 11]
Argizari-inprimaketa	Argizari-inprimagailua eta prentsa termikoa	Ertaina	Fabrikazio eskalagarria Txantiloi beharrik ez	Ekipamendu espezifikoa (argizari-inprimagailua), berotzeko urrats gehigarria, bereizmena berotze-prozesuaren araberakoa	[12]
Tinta-injekziozko inprimaketa	Tinta-injekziozko inprimagailua	Altua	Bereizmen handiko gailuak Txantiloi beharrik ez	Sistema pertsonalizatua, urrats konplexuek eskalatzea zailtzen dute	[13]
Fotolitografia	Litografia-ekipoak, UM lanparak, plaka-berogailua edo laserra	Altua	Ondo definitutako mugak	Muga hidrofobikoak sortzeko ekipamendu garestia, urrats ugari eta erreaktibo garestiak	[14]
Argizari-murgilketa	Behar den diseinuaren txantiloia, berotze-unitatea	Baxua	Prozesu merkea eta prestatzeko sinplea	Sorten arteko erreproduzigarritasun baxua eta eskalatzea mugatua	[15]
Zigilatzea	PDMS edo altzairu herdoilgaitzezko zigilua	Baxua	Prozesu merkea eta sinplea	Zigiluaren aurre-berotzea, bereizmen mugatua, eskala txikiko produkzioa	[16]
Plasma-tratamendua	Plasma hutsezko erreaktorea, txantiloi pertsonalizatuak, berotze-plaka	Altua	Material merkeak	Kostu handia, gailu mota bakoitzeko txantiloi ezberdina	[17]
Lurrunaren jalkitzea	Jalkitze-ganbera	Ertaina	Orokorrean sinplea, urrats batzuk konplexuak	Ekipamendu garestia	[18]

1.2. **Detekzio-metodoak**

Behin paperezko gailuak diseinatu eta fabrikatuta, detekzio-sistema batekin akoplatu behar dira. Detekzio-metodoak, oro har, bi sistema nagusitan banatu daitezke: optikoak eta elektrokimikoak. Metodo optikoen artean metodo kolorimetrikoak, luminiszentzian oinarrituak, edo beste metodo espektroskopiko batzuk aurki daitezke. Bestalde, metodo elektrokimikoen artean boltametria, amperometria, eta potentziometria ditugu [5]. Metodo kolorimetriko baten adibide gisa aipa daiteke merkurioa determinatzeko platinozko NPen erabilera, zeinek merkurioaren presentzian kolore urdina ematen baitute [19]. Luminiszentzian oinarritutako aplikazio bat, fluoreszentzian hain zuzen, odoleko albuminaren detekzioa izan da. Izan ere, albuminak baldintza aproposetan fluoreszentzia laranja edo berdea dauka [20]. PAD eta sentsore elektrokimiko baten akoplazioari dagokionez, eztian eta esnean ziprofloazina antibiotikoa determinatzeko metodo bat garatu da [21].

1.3. **Abantailak eta desabantailak**

Paperak dituen ezaugarriei eta PAD sistemak lortzeko garatu diren teknikei esker, azken urteetan PADetan oinarritutako metodo analitiko asko garatu dira [22]. Gainera, PADen ezaugarriak Kimika Analitiko Berdearen (KAB) printzipioekin bat datoz. Izan ere, erantzun azkarra lortzeko aukera ematen dute, energia-kontsumoa minimoa da, eta erreaktibo- eta lagin-bolumen txikiak behar dira, hondakin gutxi sortuz [23]. Bestalde, PADen erabilerak erronka edo desabantaila batzuk baditu. Lehenik, fabrikazioarekin erlazionatutako arazoak ditugu, batez ere muga hidrofobikoak ongi zehazten ez direlako. Ondoren, gerta daiteke erreaktiboak paperezko gailuan gehitzerakoan lurruntze-arazoak edukitzea, edo koloreen banaketa homogeneoa ez izatea. Bukaeran, neurketa egiteko garaian, sentikortasuna mugatua izan daiteke. Arazo horiei aurre egiteko baldintzak arretaz aukeratu behar dira (paper mota, diseinua, tenperatura, hezetasuna eta erabiltzen den disolbatzailea) [24].

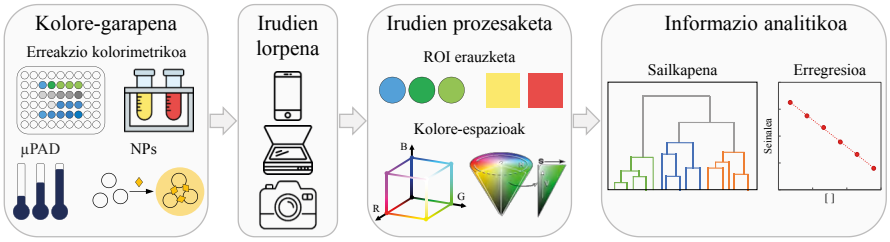
Laburbilduz, paperean oinarritutako gailu analitiko bat erabiltzeko hurrengo pausoak egin behar dira:

1. Gailuaren fabrikazioa: diseinua eta gailua lortzeko erabiliko den metodoa aukeratu.
2. Erreaktiboen gehikuntza: gailua fabrikatu ondoren, erreaktiboak paperean immobilizatu behar dira. Pauso hau gailuaren fabrikazioarekin batera ere egin daiteke, baina horrek gailuaren erabilgarritasuna aplikazio bakar batera mugatzen du.
3. Detekzio-sistema: aldaketa kimikoa edo analitoarekin erlaziona daitekeen seinalea neurtu.

2. **IRUDI DIGITALEN ANALISIA**

Esan bezala, PADak hainbat detekzio-teknikarekin konbina daitezke, eta horien artean irudi digitalen analisiko (DIA, Digital Image Analysis) metodoek ospea irabazi dute azken urteotan. Albizu eta lankideek 2020an *Ekaia* aldizkarian argitaratutako artikuluan («Irudi Digitalen Analisia: espektrofotometria ordezkatzen») DIAri buruzko azalpen xeheagoa aurki daiteke (https://doi.org/10.1387/ekaia.21860).

Kolorimetria teknika eraginkorra da azterketa-metodo azkarrak garatzeko, kolorearen identifikazioaren eta neurketaren bidez. Prozesu horretan, DIA erabiltzen da, irudi digitalen bidez esanguratsua den informazioa ateratzeko. DIAk analitoarekin lotutako kolore-informazioa jasotzen du, eta, algoritmo eta software desberdinak erabiliz, irudiak lortu, kolore-datuak erauzi eta analitoaren kuantifikazioa egiten du (2. irudia) [25].



2. irudia. DIA prozesu kolorimetrikoaren irudikapen eskematikoa [28] erreferentziatik moldatua.

Lehen pausoa irudiak lortzea da, eskanerrak, kamera digitalak edo telefono adimentsuak erabiliz. Horrela, ikusmenaren subjektibotasuna eta ekipo garestiak (espektrofotometroak) erabili beharrik gabe neurketak egin daitezke. Argiztapena faktore garrantzitsua da, eta homogeneotasuna bermatzeko argi-kutxak edo argi-mahaiak erabil daitezke. Argiztapenaren kontrola hobetzen du horrek, bai eta irudiaren kalitatea ere, grafiko-editoreen bidez irudiak hobetu daitezkeelako, baina kontu handiz informazio kimikoa ez galtzeko [26].

Irudi digitalizatuak prozesatu ondoren, intereseko gune bat hautatzen da eskuz edo automatikoki, eta kolore-informazioa sistema numerikoen bidez erauzten da. Sistema ugari existitzen dira, hala nola RGB (*Red*, gorria; *Green*, berdea; *Blue*, urdina), HSV (*Hue*, tonua; *Saturation*, saturazioa; *Value*, balioa), CMYK (*Cyan*, zian; *Magenta*, magenta; *Yellow*, horia; *Key*, beltza), edo YC_BC_R (Y, *luminance*, luminantzia; C_B, *blue chroma*, kolore urdina; C_R, *red chroma*, kolore gorria). RGB da sistema ezagunena, baina aplikazioaren arabera beste sistemak ere ohikoak dira. Koloreak kuantifi-

katu eta aztertzeko, kolore-kanal ezberdinen balioak edo haien arteko erlazioak kalkulatzen dira [27].

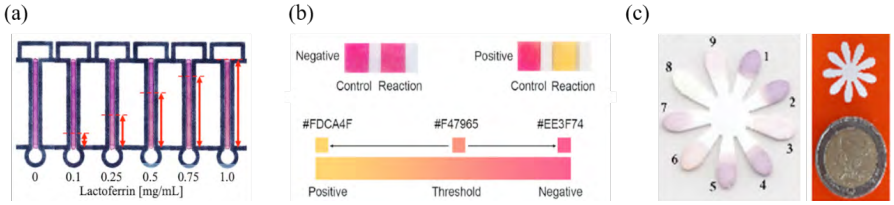
Azkenik, analisi kuantitatiboak erauzitako kolore-balioak eta analitoaren kontzentrazioa erlazionatzen ditu. Erlazio horiek linealak izan daitezke, eta hainbat aldagai erabil daitezke analitoaren kuantifikaziorako, hala nola batezbestekoak, kanalen baturak edo erlazio matematiko konplexuak.

3. **APLIKAZIO KOLORIMETRIKOAK**

DIA metodoek jasotako ospea haien sinpletasunari, azkartasunari, eramangarritasunari eta fabrikazio-kostu baxuari zor zaie. Gainera, analito ugari determina daitezke, eta ez da ekipamendu espezializaturik behar. Determinazioak kualitatiboak (bai/ez, begi hutsez), erdi kuantitatiboak (kontaketa) edo kuantitatiboak izan daitezke, bai koloreen intentsitatea erabiliz, bai distantzian oinarritutako neurketak erabiliz [29]. Kasu konplexuago batzuetan, ordea, DIAk eskaintzen duen detekzio-sinpletasuna baliatzen da metodo kimiometrikoekin batera. Teknika erabilienak Osagai Nagusi Bidezko Analisia (PCA, *Principal Component Analysis*), Analisi Lineal Diskriminatzailea (LDA*, Linear Discriminant Analysis*) eta Euskarri Bektoredun Makinak (SVM, *Support Vector Machines*) dira. Erreminta horiei buruzko informazio osagarria bibliografian jaso da [30]. Hala, PADen eta DIAren erabileraren inguruko erreferentzia ugari aurki daitezke literaturan.

3.1. **Lagin klinikoak**

Esan bezala, PADen erabilerak bertatik bertarako neurketak ahalbidetzen ditu, eta, hortaz, arreta-puntuan diagnostiko azkarrak egin daitezke, batez ere baliabide mugatuko kokalekuetan, osasun-laguntza eta esku-hartze mediko puntualak hobetuz. Esaterako, argizariz inprimatutako gailuak erabili dira kreatinina [31] eta laktoferrina [32] analizatzeko, lehen kasuan gailu mikrofluidikoa eta kamera digitala erabiliz, eta bigarrenean, distantzian oinarritutako kalibrazioa eta mahaigaineko eskanerra (3a irudia). Bestalde, tinta-inprimaketa bidez sortutako banakako PADak erabili dira hemoglobina [33] eta glukosa [34] kuantifikatzeko, bi kasuetan telefono adimentsuak erabilita. Azkenik, mozketaz sortutako PADen bidez bisualki SARS-CoV-2 determinatzeko metodoa garatu da [35] (3b irudia), eta laser-mozketaz sortutako PADen bidez aminoazido-nahasteak [36] (3c irudia). Azken lan horretan, eskanerra erabiliz lortu dira irudiak, eta horietatik erauzitako RGB kolore-balioekin sortutako matrizeetan aplikatu dira PCA, Multzokatze Hierarkiko Bidezko Analisia (HCA, Hierarchical Cluster Analysis) eta LDA metodo kimiometrikoak.



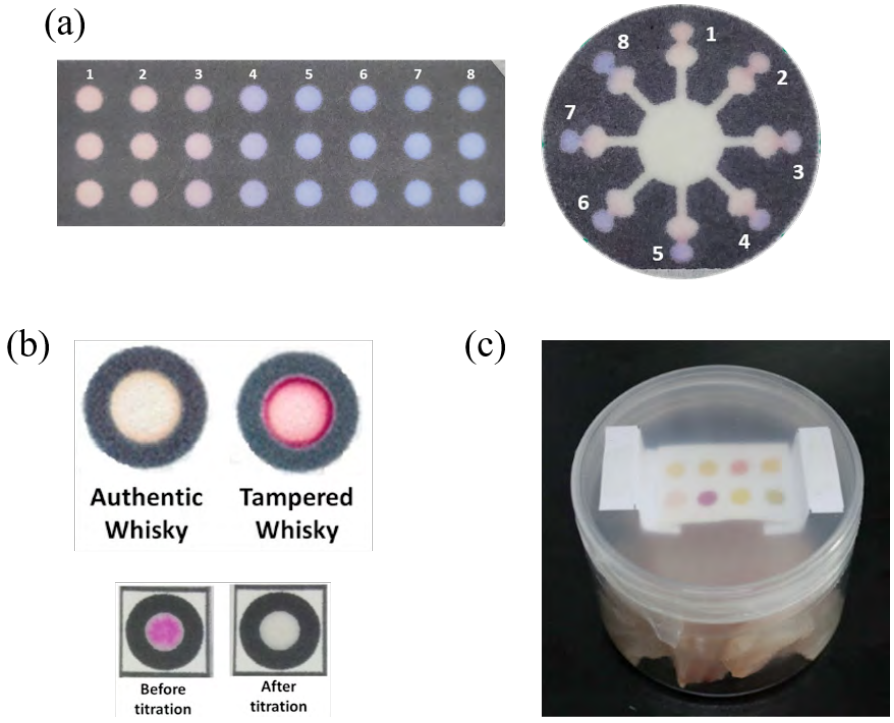
3. irudia. Lagin klinikoak analizatzeko erabili diren hainbat PAD. (a) Laktoferrinaren analisia [32], (b) COVIDaren detekzioa [35], eta (c) aminoazido-nahasteen analisia. Irudiak egileen baimenez erreproduzitu dira [36].

3.2. **Elikagaiak**

PADak elikagai-industrian ere erabil daitezke, batez ere elikagaien kalitatea eta segurtasuna kontrolatzeko eta egiaztatzeko. Besteak beste, kutsatzaileak eta patogenoak detektatzeko erabili dira, baita freskotasuna neurtzeko edo pestizida-mailak ebaluatzeko. Lan gehienetan argizariz inprimatutako gailuak erabili dira, eta, askotan, balorazioak erabiltzen dira intereseko analitoak determinatzeko. Zehazki, ozpin-laginetan azido-base balorazioan oinarrituz azido azetikoa determinatzeko metodoa proposatu da [1]. Lan horretan bi gailu klase aurkeztu dira: bata, banakako frogak egiteko, eta bestea, mikrofluidikan oinarritutakoa. Bi kasuetan telefono adimentsua erabiliz eskuratu dira irudiak, eta R kolore-kanaleko balioak erabili dira azido-kontzentrazioa kuantifikatzeko (4a irudia). Beste ikerlan batean, aldiz, azido askorbikoa analizatzeko distantzian oinarritutako gailua garatu dute [38]. Kasu horretan, balorazio iodometriko bidez eta azido kontzentrazioaren arabera, gailuaren kanalak urdinez koloreztatzen dira. Azkenik, whiski-laginetan alkohol-edukia determinatzeko metodoa garatu dute, banakako puntuetan erredox balorazioa eginez eta begi hutsezko detekzioa baliatuz [37] (4b irudia).

Bestalde, literaturan kimiometria aplikatzen duten lanak ere aurkitu daitezke. Esaterako, Lyu eta lankideek freskagarrietan eta bestelako edarietan sakaridoak analizatzeko metodoa garatu dute [39]. Lehenengo, esperimentuen diseinua aplikatu dute sistemako 4 faktoreren balioak optimizatzeko: argizarizko inprimaketa-zikloak, kanalen luzera, kanalen zabalera eta jarritako analito kopurua. Ondoren, LDA eta SVM aplikatu dituzte sailkapen- eta kuantifikazio-lanetarako. Gainera, arrainaren freskotasuna determinatzeko metodo bat aurkitu da [40]. Lan horretan fotolitografiaz sortutako PADa erabili da, irudiak kamera digitalez eskuratuz. Kolore-balioak analizatzeko eta nitrogeno lurrunkorraren mailak sailkatu eta kuantifikatzeko, PCA, LDA eta BPNN (*Back-propagation Neural Network*) teknikak erabili dira (4c irudia). Lehen kasuan, datu-matrizea 28 aldagaiz osatuta dago; hau da, 4 sentsore eta 7 kolore-balio (R, G, B, Y, Cb, Cr eta grisen

eskala) erabili dira, eta bigarrenean, ordea, 8 adierazlek eta 3 kolore-baliok (R, G eta B kanalak) 24 aldagaiko matrizea osatzen dute.



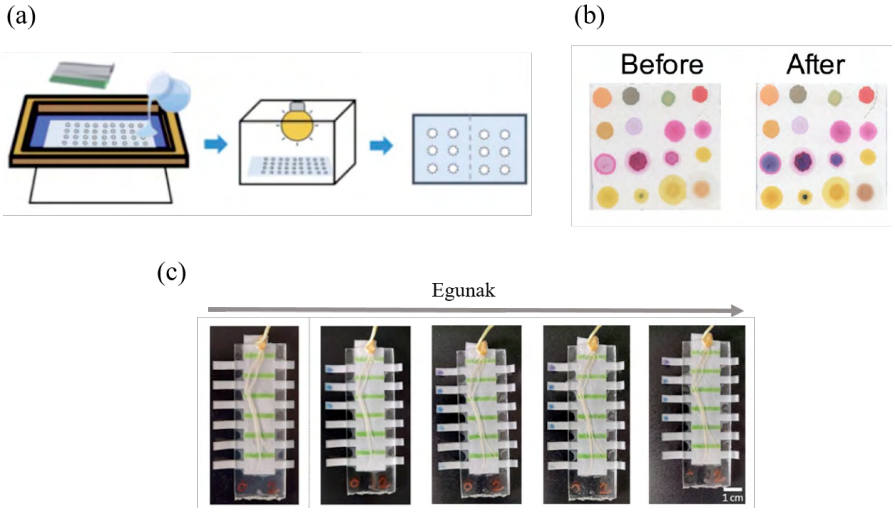
4. irudia. (a) Azido azetikoaren determinazioa ozpin-laginetan [1], (b) whiskien faltsutzearen analisia [37], eta (c) arrainaren freskotasunaren ebaluazioa. Irudiak egileen baimenez erreproduzitu dira [40].

3.3. **Ingurumen-laginak**

Elikagai-laginetan egiten den antzera, ingurumen-laginetan ere PADak kutsatzaileak (hala nola pestizidak eta patogenoak) detektatzeko eta horien mailak neurtzeko aplika daitezke. Adibidez, arroz-soroen lur-laginetan amoniakoa kuantifikatzeko gailua proposatu da. Metodoa banakako neurketetan datza, erretxina ultramorez inprimatua da, eta irudiak eskanerrarekin lortu dira [41] (5a irudia). Amoniakoarekin jarraituz, beste lan batean oilategiko airea analizatu da amoniako gaseosoa ikertu nahian. Kasu horretan, gailuak mozketaz sortu dira, eta irudiak telefono adimentsuarekin lortu dira [42]. Kuantifikazioak RGB sistemako R kanalarekin eta HSV sistemako H kanaleko balioekin egin dira, hurrenez hurren. Telefono adimentsua ere erabili da lur-laginetan merkurioa determinatzeko, horreta-

rako erretxinaz inprimatutako gailu mikrofluidikoa eta G kanaleko balioak erabiliz [43]. Bukatzeko, Patko eta lankideek aurkeztutako lanean negu-gariaren erroetatik exudatutako glukosa ikertu da [44]. Horretarako, argizariz inprimatutako gailu mikrofluidikoa baliatu da, eta kamera digitalez lortu dira irudiak egun ezberdinetan (5c irudia).

Horrez gain, PCA teknika kimiometrikoa erabili da konposatu organiko lurrunkorrak analizatzeko etxeko gela ezberdinetako airean [45] (5b irudia), PCA eta Minimo Karratu Partzialen Bidezko Erregresioa (PLS, *Partial Least Squares Regression*) metal astunak analizatzeko [46], eta LDA sailkapeneko eta SVM erregresioko teknikak oxianioak determinatzeko herbizida komertzialetan [47]. Hiru kasuetan banakako probak erabili dira, eta, hurrenez hurren, mozketaz, fotolitografiaz eta argizari-inprimaketaz sortu dira PADak. Lehen lanean eskanerra eta distantzia euklidearra erabili dira datu-matrizea sortzeko, bigarrenean telefono adimentsua eta LAB kolore-sistemako balioak, eta hirugarrenean eskanerra eta 4 sentsorez osatutako 56 aldagai.



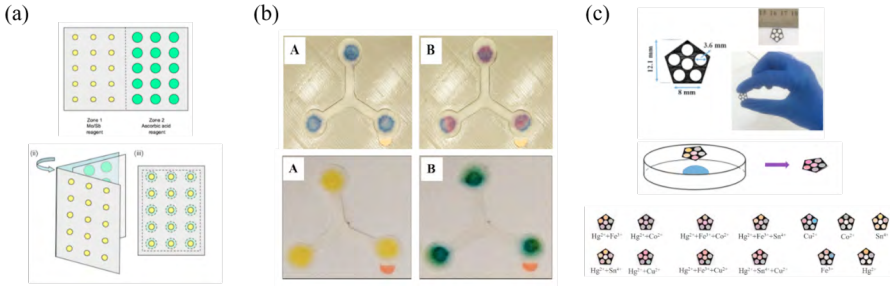
5. irudia. (a) Amoniakoaren determinazioa UV erretxinaz inprimatutako PADa erabiliz [41], (b) etxeko geletako airearen analisia PCA bidez [45], eta (c) sustraietatik exudatutako glukosaren kuantifikazioa. Irudiak egileen baimenez erreproduzitu dira [44].

3.4. **Ur-laginak**

Amaitzeko, proposamen ugari daude literaturan zeinetan metal astunak, kutsatzaileak eta patogenoak determinatzen diren ur-laginetan. Metodo ho-

riek PADetan aplikatzea ere interesgarria da, bertatik bertara detekzio azkarrak egiteko baliagarriak izan daitezke eta. Esate baterako, tinta-injekziozko inprimaketaz eraikitako PAD tolesgarria fosfatoa determinatzeko erabili da (6a irudia), eta, horretarako, eskanerrez eskuratutako irudietatik R kanaleko balioak erauzi dira [48]. Aintzira natural, putzu artifizial eta iturriko ur-laginetan gogortasun totala, fenol kantitatea eta pH-a determinatzeko metodoa ere proposatu da [49]. 6b irudian ikus daitekeen bezala, determinazio bakoitzerako gailu mikrofluidiko bat erabili da, mozketaz sortutakoa. Kasu horretan, telefono adimentsuz eskuratu dira irudiak, eta M (magenta) eta Y (horia) kolore-kanalak erabili dira. Hipokloritoa ere analizatu da, bai lurpeko uretan, bai ibai-uretan. PADak mozketaz fabrikatu dira, eta irudiak kamera digitalarekin lortu dira [50].

Gainera, iturriko uretan eta kolutorioetan azetatoa, zianuroa, fluoruroa eta fosfatoa determinatzeko metodo bateratua proposatu da [51]. Gailu mikrofluidikoak laserrez moztu dira, eta PLS-DA (*Partial Least Squares-Discriminant Analysis*) eta SVM teknika kimiometrikoak aplikatu dira. Datu-matrizea sortzeko kamera digitala eta RGB eta HSV kolore-sistemetako balioak erabili dira. Beste ikerlan batean, 25 metal astunen analisia egin da [52]. Gailuak tinta-injekziozko inprimaketaz sortu dira (6c irudia), eta datu-matrizea osatzeko 18 aldagai erabili dira (6 sentsore × 3 RGB balio), kolore-balioak eskaner-irudietatik erauziz. Aplikatutako teknika kimiometrikoak PCA, HCA eta LDA izan dira, eta erabilitako laginak iturriko ura eta hondakin-urak. Azkenik, ibaietako ur-laginetan metal-ioiak analizatzeko, hauek erabili dira: argizariz inprimatutako gailua, eskanerra, 4 adierazle eta 7 kolore-balio, eta LDA sailkapeneko eta SVM erregresioko teknikak [53].



6. irudia. Ur laginak analizatu dituzten hainbat ikerlan. (a) fosfatoaren determinazioa PAD tolesgarria erabiliz [48], (b) gailu mikrofluidikoa gogortasun totala, fenol kantitatea eta pH-a determinatzeko [49], eta (c) 25 metal astunen analisia teknika kimiometrikoekin konbinatuz. Irudiak egileen baimenez erreproduzitu dira [52].

4. ERRONKAK ETA HURRENGO URRATSAK

Paperezko gailuen erabilerari buruzko desabantaila edo erronka nagusiak lehenago aipatu dira. Horien artean aipatzekoak dira kolorearen aldakortasuna edo zehaztasun falta, sentikortasun- eta selektibitate-mugak eta egonkortasun-arazoak. PADen erabilgarritasuna zabaltzeko modurik interesgarriena bertatik bertara (*point of need*, *point of care*) neurketak egiteko metodoak garatzea da. Izan ere, aipatutako lagin mota guztiak analizatzea ahalbidetuko lukete, paperezko gailuek duten eramangarritasunari esker. Hala, era sinplean eta azkarrean lortu ahal izango dira emaitzak, eraginkortasuna handituz.

Dena den, bertatik bertarako metodoen garapenak ere erronka batzuk ditu. Esaterako, gailuaren egonkortasuna denboran zehar, batez ere epe luzeko biltegiratzeetan; biltegiratze-metodoa (giro-tenperaturan, desekadorean, hozkailuan…), eta airearen hezetasunaren eta tenperaturaren eragina lehortze-prozesuan eta erreakzio zinetikoetan, adibidez. Gainera, DIA erabiltzen den kasuetan koloredun produktuaren egonkortasunak irudien kalitateari eragiten dio. Horrez gain, inguruneko argitasunak ere eragina izango du irudietan, eta, horregatik, ezinbestekoa da irudiak era kontrolatu eta estandarizatuan lortzea.

Azkenik, erreminta kimiometrikoak erabiltzeak sistema konplexuak ebaztea ahalbidetzen du, baina kontuan hartu beharreko faktore batzuk ere badaude. Muga handienetako bat datu-matrizearen kalitatea da. Garrantzitsua da laginen eta aldagaien arteko erlazioa kontrolatzea eredu sendoak lortzeko. Horrez gain, laborategitik *in situ*rako trantsizioa kontuan hartzea ezinbestekoa da. Izan ere, zehaztasun falta egon daiteke bertatik bertarako neurketetan patroiekin sortutako ereduak zuzenean aplikatzen direnean. Ereduak sakonki balioztatu behar dira, baldintza-aldaketen aurrean duten sendotasuna frogatzeko.

Erronkak alde batera utzita, PADak iraultza bat ekar dezakete substantzien analisira, orain arte erabili diren metodoen alternatiba irisgarria baitira haien diseinu eramangarria, kostu txikia eta erabiltzeko erraztasuna direla eta. Material merkeekin fabrikatu daitezke PADak, eta, horregatik, baliabide gutxiko eskualdeetan erabil daitezke. Gainera, sistema gehienek ez dute langile espezializaturik edo ekipo konplexurik behar. PADen moldakortasunak eta arintasunak areagotzen dute haien potentziala. Azkenik, azpimarratu behar da gailu hauek aukera ematen dutela erantzun azkarrak lortzeko, eta, gainera, hondakin gutxi sortzen direla, alde batetik, osagai nagusia papera delako, eta, bestetik, laginen eta erreaktiboen beharrezko bolumenak oso txikiak direlako.

Abantaila horiei esker, PADek potentzial handia dute analisi kimikoa demokratizatzeko, eta, besteak beste, gaixotasunen detekzioa, uraren ka-

litatea edo elikagaien segurtasuna hobetzeko. Tresna hauen garapenak eta optimizazioak aurrera jarraitzen duenez, etorkizunean aukera berriak irekiko dira.

ESKER ONAK

Artikulu hau Eusko Jaurlaritzak (IT1662/22 Ikerketa Taldea) eta Euskal Herriko Unibertsitateak (PIF 19/131 doktorego-aurreko beka) emandako dirulaguntzei esker eraman da aurrera.

BIBLIOGRAFIA

[1] Berasarte, I., Bordagaray, A., Garcia-Arrona, R., Ostra, M., Reis de Araujo, W., Vidal, M. 2024. «Microscale titration of acetic acid using digital colorimetry and paper-based analytical devices». *Talanta,* **276**, 126254.

[2] Pradela-Filho, L. A., Veloso, W. B., Arantes, I. V. S., Gongoni, J. L. M., de Farias, D. M., Araujo, D. A. G., Paixão, T. R. L. C. 2023. «Paper-based analytical devices for point-of-need applications». *Microchimica Acta,* **190**, 179.

[3] Berasarte, I., Albizu, G., Santos, W. F., de Lima, L. F., Ostra, M., Vidal, M., de Araujo, W. R. 2025. «Chemometrics and digital image colorimetry approaches applied to paper-based analytical devices: A review». *Analytica Chimica Acta,* **1339**, 343577.

[4] De Lima, L. F., Ferreira, A. L., Ranjan, I., Collman, R. G., de Araujo, W. R., de la Fuente-Nunez, C. 2023. «A bacterial cellulose-based and low-cost electrochemical biosensor for ultrasensitive detection of SARS-CoV-2». *Cell Reports Physical Science,* **4**, 101476.

[5] Nery, E. W., Kubota, L. T. 2013. «Sensing approaches on paper-based devices: A review». *Analytical and Bioanalytical Chemistry,* **405**, 7573-7595.

[6] Martinez, A. W., Phillips, S. T., Butte, M. J., Whitesides, G. M. 2007. «Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays». *Angewandte Chemie - International Edition,* **46**, 1318-1320.

[7] Batista Deroco, P., Giarola, J. de F., Wachholz Júnior, D., Arantes Lorga, G., Tatsuo Kubota, L.Comprehensive Analytical Chemistry. 2020, pp. 91-137.

[8] Ozer, T., McMahon, C., Henry, C. S. 2020. «Advances in Paper-Based Analytical Devices». *Annual Review of Analytical Chemistry,* **13**, 85-109.

[9] Jiang, Y., Hao, Z., He, Q., Chen, H. 2016. «A simple method for fabrication of microfluidic paper-based analytical devices and on-device fluid control with a portable corona generator». *RSC Advances,* **6**, 2888-2894.

[10] Fang, X., Wei, S., Kong, J. 2014. «Paper-based microfluidics with high resolution, cut on a glass fiber membrane for bioassays». *Lab on a Chip,* **14**, 911.

[11] SPICAR-MIHALIC, P., TOLEY, B., HOUGHTALING, J., LIANG, T., YAGER, P., FU, E. 2013. «CO_2 laser cutting and ablative etching for the fabrication of paper-based devices». *Journal of Micromechanics and Microengineering,* **23**, 067003.

[12] LU, Y., SHI, W., JIANG, L., QIN, J., LIN, B. 2009. «Rapid prototyping of paper-based microfluidics with wax for low-cost, portable bioassay». *Electrophoresis,* **30**, 1497-1500.

[13] ABE, K., SUZUKI, K., CITTERIO, D. 2008. «Inkjet-Printed Microfluidic Multianalyte Chemical Sensing Paper». *Analytical Chemistry,* **80**, 6928-6934.

[14] OUYANG, L., WANG, C., DU, F., ZHENG, T., LIANG, H. 2014. «Electrochromatographic separations of multi-component metal complexes on a microfluidic paper-based device with a simplified photolithography». *RSC Adv.,* **4**, 1093-1101.

[15] SONGJAROEN, T., DUNGCHAI, W., CHAILAPAKUL, O., LAIWATTANAPAISAL, W. 2011. «Novel, simple and low-cost alternative method for fabrication of paper-based microfluidics by wax dipping». *Talanta,* **85**, 2587-2593.

[16] CURTO, V. F., LOPEZ-RUIZ, N., CAPITAN-VALLVEY, L. F., PALMA, A. J., BENITO-LOPEZ, F., DIAMOND, D. 2013. «Fast prototyping of paper-based microfluidic devices by contact stamping using indelible ink». *RSC Advances,* **3**, 18811.

[17] LI, X., TIAN, J., NGUYEN, T., SHEN, W. 2008. «Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma Treatment». *Analytical Chemistry,* **80**, 9131-9134.

[18] KWONG, P., GUPTA, M. 2012. «Vapor Phase Deposition of Functional Polymers onto Paper-Based Microfluidic Devices for Advanced Unit Operations». *Analytical Chemistry,* **84**, 10129-10135.

[19] CHEN, W., FANG, X., LI, H., CAO, H., KONG, J. 2016. «A Simple Paper-Based Colorimetric Device for Rapid Mercury(II) Assay». *Scientific Reports,* **6**, 31948.

[20] LUO, Z., LV, T., ZHU, K., LI, Y., WANG, L., GOODING, J. J., LIU, G., LIU, B. 2020. «Paper-Based Ratiometric Fluorescence Analytical Devices towards Point-of-Care Testing of Human Serum Albumin». *Angewandte Chemie,* **132**, 3155-3160.

[21] CUNHA DE SOUZA, C., FIGUEIRA ALVES, G., PEDROSA LISBOA, T., COSTA MATOS, M. A., CAMARGO MATOS, R. 2022. «Low-cost paper-based electrochemical sensor for the detection of ciprofloxacin in honey and milk samples». *Journal of Food Composition and Analysis,* **112**, 104700.

[22] NISHAT, S., JAFRY, A. T., MARTINEZ, A. W., AWAN, F. R. 2021. «Paper-based microfluidics: Simplified fabrication and assay methods». *Sensors and Actuators, B: Chemical,* **336**, 129681.

[23] TOBISZEWSKI, M., MECHLINSKA, A., NAMIE, J. 2010. «Green analytical chemistry - theory and practice». *Chemical Society Reviews,* **39**, 2869-2878.

[24] LI, X., BALLERINI, D. R., SHEN, W. 2012. «A perspective on paper-based microfluidics: Current status and future trends». *Biomicrofluidics,* **6**, 011301.

[25] VIDAL, M., GARCIA-ARRONA, R., BORDAGARAY, A., OSTRA, M., ALBIZU, G. 2018. «Simultaneous determination of color additives tartrazine and allura red in food products by digital image analysis». *Talanta,* **184**, 58-64.

[26] ALBIZU, G., BERASARTE, I., BORDAGARAY, A., DÁVILA, S., JAIME-BARQUERO, E. 2021. «Irudi Digitalen Analisia: espektrofotometroa ordezkatzen». *EKAIA-Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria* 189-209.

[27] CAPITÁN-VALLVEY, L. F., LÓPEZ-RUIZ, N., MARTÍNEZ-OLMOS, A., ERENAS, M. M., PALMA, A. J. 2015. «Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review». *Analytica Chimica Acta,* **899**, 23-56.

[28] CAPITÁN-VALLVEY, L. F., LÓPEZ-RUIZ, N., MARTÍNEZ-OLMOS, A., ERENAS, M. M., PALMA, A. J. 2015. «Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review». *Analytica Chimica Acta,* **899**, 23-56.

[29] MORBIOLI, G. G., MAZZU-NASCIMENTO, T., STOCKTON, A. M., CARRILHO, E. 2017. «Technical aspects and challenges of colorimetric detection with microfluidic paper-based analytical devices (μPADs) - A review». *Analytica Chimica Acta,* **970**, 1-22.

[30] BRERETON, R. G., JANSEN, J., LOPES, J., MARINI, F., POMERANTSEV, A., RODIONOVA, O., ROGER, J. M., WALCZAK, B., TAULER, R. 2017. «Chemometrics in analytical chemistry—part I: history, experimental design and data analysis tools». *Analytical and Bioanalytical Chemistry,* **409**, 5891-5899.

[31] SUNUNTA, S., RATTANARAT, P., CHAILAPAKUL, O., PRAPHAIRAKSIT, N. 2018. «Microfluidic paper-based analytical devices for determination of creatinine in urine samples». *Analytical Sciences,* **34**, 109-113.

[32] KUDO, H., MAEJIMA, K., HIRUTA, Y., CITTERIO, D. 2020. «Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Colorimetric Detection of Lactoferrin». *SLAS Technology,* **25**, 47-57.

[33] BISWAS, S. K., CHATTERJEE, S., BANDYOPADHYAY, S., KAR, S., SOM, N. K., SAHA, S., CHAKRABORTY, S. 2021. «Smartphone-Enabled Paper-Based Hemoglobin Sensor for Extreme Point-of-Care Diagnostics». *ACS Sensors,* **6**, 1077-1085.

[34] KISHNANI, V., KUMARI, S., GUPTA, A. 2022. «A Chemometric-Assisted Colorimetric-Based Inexpensive Paper Biosensor for Glucose Detection». *Biosensors,* **12**, 1008.

[35] DAVIDSON, J. L., WANG, J., MARUTHAMUTHU, M. K., DEXTRE, A., PASCUAL-GARRIGOS, A., MOHAN, S., PUTIKAM, S. V. S., OSMAN, F. O. I., MCCHESNEY, D., SEVILLE, J., VERMA, M. S. 2021. «A paper-based colorimetric molecular test for SARS-CoV-2 in saliva». *Biosensors and Bioelectronics: X,* **9**, 100076.

[36] ALIMOHAMMADI, M., SHARIFI, H., TASHKHOURIAN, J., SHAMSIPUR, M., HEMMATEENEJAD, B. 2023. «A paper-based chemical tongue based on the charge transfer complex of ninhydrin with an array of metal-doped carbon

dots discriminates natural amino acids and several of their enantiomers». *Lab on a Chip,* **23**, 3837-3849.

[37] NOGUEIRA, S. A., LEMES, A. D., CHAGAS, A. C., VIEIRA, M. L., TALHAVINI, M., MORAIS, P. A. O., COLTRO, W. K. T. 2019. «Redox titration on foldable paper-based analytical devices for the visual determination of alcohol content in whiskey samples». *Talanta,* **194**, 363-369.

[38] LIN, X., JIN, X., XU, C., LAI, H., LIN, M., REN, N., CAI, L. 2023. «Iodometric Titration on Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Determination of Ascorbic Acid: A Laboratory Experiment for Chemical Education Undergraduates». *Journal of Chemical Education,* **100**, 1997-2002.

[39] LYU, X., HAMEDPOUR, V., SASAKI, Y., ZHANG, Z., MINAMI, T. 2021. «96-Well Microtiter Plate Made of Paper: A Printed Chemosensor Array for Quantitative Detection of Saccharides». *Analytical Chemistry,* **93**, 1179-1184.

[40] WANG, G., CHENG, J., MA, J., HUANG, S., ZHANG, T., LI, Y., LI, H. 2022. «Preparation and application of an olfactory visualization freshness sensor array based on microfluid paper-based chip». *Journal of Food Processing and Preservation,* **46**, e16530.

[41] THONGKAM, T., RUNGSIRISAKUN, R., HEMAVIBOOL, K. 2020. «A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil». *Analytical Methods,* **12**, 4649-4656.

[42] KHACHORNSAKKUL, K., HUNG, K. H., CHANG, J. J., DUNGCHAI, W., CHEN, C. H. 2021. «A rapid and highly sensitive paper-based colorimetric device for the on-site screening of ammonia gas». *Analyst,* **146**, 2919-2927.

[43] NASHUKHA, H. L., SITANURAK, J., SULISTYARTI, H., NACAPRICHA, D., URAISIN, K. 2021. «Simple and equipment-free paper-based device for determination of mercury in contaminated soil». *Molecules,* **26**, 2004.

[44] PATKO, D., GUNATILAKE, U. B., GONZALEZ-GAYA, B., DUPUY, L. X., BASABE-DESMONTS, L., BENITO-LOPEZ, F. 2024. «Spatial and temporal detection of root exudates with a paper-based microfluidic device». *Soil Biology and Biochemistry,* **195**, 109456.

[45] DUFFY, E., HUTTUNEN, K., LAHNAVIK, R., SMEATON, A. F., MORRIN, A. 2021. «Visualising household air pollution: Colorimetric sensor arrays for monitoring volatile organic compounds indoors». *PLoS ONE,* **16**, 1-15.

[46] GRASIANTO, FUKUYAMA, M., KASUYA, M., MOTT, D. M., KOSEKI, Y., KASAI, H., HIBARA, A. 2023. «Sensitive and simple multi-ion detection using organic nanocrystal enrichment in paper analytical devices». *Analytica Chimica Acta,* **1273**, 341451.

[47] ZHANG, Z., HAMEDPOUR, V., LYU, X., SASAKI, Y., MINAMI, T. 2021. «A Printed Paper-Based Anion Sensor Array for Multi-Analyte Classification: On-Site Quantification of Glyphosate». *ChemPlusChem,* **86**, 798-802.

[48] JAYAWARDANE, B. M., MCKELVIE, I. D., KOLEV, S. D. 2012. «A paper-based device for measurement of reactive phosphate in water». *Talanta,* **100**, 454-460.

[49] Da Silva, V. A. O. P., de Freitas, R. C., de Oliveira, P. R., Cardoso Moreira, R., Marcolino-Júnior, L. H., Bergamini, M. F., Coltro, W. K. T., Campos Janegitz, B. 2020. «Microfluidic paper-based device integrated with smartphone for point-of-use colorimetric monitoring of water quality index». *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation,* **164**, 108085.

[50] Debnath, S., Ghosh, R., Pragti, N., Mukhopadhyay, S., Baskaran, K. V., Chatterjee, P. B. 2023. «Fabrication of a paper-based facile and low-cost microfluidic device and digital imaging technique for point-of-need monitoring of hypochlorite». *Analyst,* **148**, 4072-4083.

[51] Jiménez-Carvelo, A. M., Salloum-Llergo, K. D., Cuadros-Rodríguez, L., Capitán-Vallvey, L. F., Fernández-Ramos, M. D. 2020. «A perfect tandem: chemometric methods and microfluidic colorimetric twin sensors on paper. Beyond the traditional analytical approach». *Microchemical Journal,* **157**, 104930.

[52] Sharifi, H., Tashkhourian, J., Hemmateenejad, B. 2022. «Identification and determination of multiple heavy metal ions using a miniaturized paper-based optical device». *Sensors and Actuators B: Chemical,* **359**, 131551.

[53] Sasaki, Y., Lyu, X., Minami, T. 2023. «Printed colorimetric chemosensor array on a 96-microwell paper substrate for metal ions in river water». *Frontiers in Chemistry,* **11**, 1134752.