



Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado
Biologia Gradua / Grado en Biología

Hondakin-urak tratatzeko fitoarazte- sistemen ebaluazioa: diseinua, implementazioa eta eraginkortasunaren analisi mikrokosmos eskalan

Egilea/Autor/a:
Aitor González González

Zuzendaria/Director/a:
María Teresa Gómez Sagasti

Zuzendarikidea/Codirector/a:
Unai Artetxe Aspiunza

© 2025, Aitor González González

Leioa, 2025eko ekainaren 20a/Leioa, 20 de junio de 2025

AURKIBIDEA

1. SARRERA.....	3
2. HIPOTESIA ETA HELBURUAK	5
3. MATERIALA ETA METODOAK	5
3.1. Diseinu esperimental	5
3.2. Fitoarazte-sistemako hondakin-uren kudeaketa eta laginketak.....	6
3.3. Hondakin-uren kalitatearen egoeraren determinazioa	6
3.3.1. Ur-kalitatearen adierazle fisiko-kimikoak monitorizazio-etapan.....	6
3.4. Landareen osasunaren determinazioa.....	8
3.4.1. Parametro biometrikoak: landareen biomasa.....	8
3.4.2. Parametro fisiologikoen determinazioa.....	8
3.5. Datuen tratamendu estatistikoa.....	8
4. EMAITZAK.....	9
4.1. Fitoarazte-sisteman erabilitako hondakin-uren karakterizazioa.....	9
4.2. Fitoarazte-tratamenduen eragina uraren kalitatean monitorizazio-etapan.....	9
4.3. Fitoarazte-sistemen eragina uraren kalitatean esperimentuaren amaieran.....	10
4.4. Landareen osasun-egoera fitoarazte-esperimentuaren amaieran	12
5. EZTABAIDA.....	14
5.1. Fitoarazte-sistemaren eraginkortasunaren ebaluazioa hondakin-uren kalitatearen adierazleen arabera	14
5.2. Fitoarazte-sistemaren eraginkortasunaren ebaluazioa landare-osasunaren adierazleen arabera.....	16
5.3. Landareen aukeraketa, fitoarazte-sistemaren eraginkortasunaren gakoa.....	17
6. ONDORIOAK	17
7. GrAL GARAPEN JASANGARRIRAKO HELBURUEKIN (GJH) DUEN LOTURA.	18
8. ESKER ONAK.....	19
9. BIBLIOGRAFIA.....	19
10. ERANSKINAK.....	22

LABURPENA

Fitoarazte-sistemak (FS) hondakin-uren tratamendurako Naturan Oinarritutako Konponbide (NOK) jasangarriak dira. Hezegune artifizialetan oinarritutako sistema hauek landa-eremu isolatueta tratamendu tertziario gisa erabil daitezke, bereziki nitrogeno (N) eta fosforoa (P) murrizteko. Lan honen helburua izan zen hondakin-urak tratatzeko FS esperimental bat garatzea, tratatutako uretako N eta P kontzentrazioak ibai-ibilguetan isurtzeko mugak gainditzen ez zituztela bermatzeko. Mikrokosmos eskalan diseinatutako FS baten bidez, *Typha sp.*, *Carex riparia* eta *Ceratophyllum demersum* espezieak aztertu ziren, banaka zein konbinatuta, hondakin-uren tratamendu tertziario gisa zuten eraginkortasuna ebaluatzeko. 40 eguneko esperimentuan zehar, marmolina substratu moduan erabilia, ur-kalitatearen adierazle fisiko-kimikoak eta landareen parametro fisiologikoak aztertu ziren. Emaitzek erakutsi zuten, alde batetik, hiru espezieak, banaka zein era konbinatuan, N eta P kontzentrazioak eraginkortasunez murrizteko gai zirela landare guztiek osasun-egoera egokia mantenduta; eta bestetik, marmolina substratuak mantenugaiak ezabatzen laguntzen zuela. Nahiz eta lortutako emaitzetatik ezin izan zen zehaztu espezie konbinatuek banakakoek baino eraginkortasun handiagoa zutenik, landare-dibertsitatearen aldeko apustua egitea aldarrikatzen da, mantenugaien ezabapenerako bidezidor biokimiko osagarriak ahalbidetzen baititu. Ikerketa honen ekarpen nagusia da FS optimizatzeko faktoreak detektatzea eta uraren kalitatearen eta landareen parametro fisiologikoen ebaluazio integratuaren garrantzia aurkeztea.

Hitz-gakoak: fitoarazte-sistemak, hondakin-urak, landare hidrofitoak, nitrogenoa eta fosforoa, ur-kalitatea, landare-osasuna.

ABSTRACT

Phytodepuration systems (PS) are sustainable Nature-Based Solutions (NBS) for wastewater treatment. These systems, based on constructed wetlands, can be used as tertiary treatment in isolated rural areas, particularly to reduce nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations. The aim of this study was to develop an experimental PS for wastewater treatment and ensure that the N and P concentrations in the treated water do not exceed the legal discharge limits into river channels. Using microcosm-scale PS, the effectiveness of three species, *Typha sp.*, *Carex riparia* and *Ceratophyllum demersum*, was evaluated both individually and in combination as tertiary treatment agents for wastewater. Throughout the 40-day experiment, physical-chemical indicators of water quality and physiological parameters of the plants were analyzed, using white marble as a substrate. The results show, on the one hand, that all three species, whether used individually or together, were able to significantly

reduce N and P concentrations while maintaining good plant health; and on the other hand, that the white marble substrate also contributed to nutrient removal. Although the results did not clearly indicate greater efficiency in the plant combinations compared to individual species, this study advocates for promoting plant diversity, as it enables complementary biochemical pathways for nutrient removal. The main contribution of this study is the identification of key factors for optimizing PS and the presentation of the importance of an integrated evaluation of water quality and plant physiological parameters.

Keywords: phytodepuration systems, wastewater, hydrophyte plants, nitrogen and phosphorus, water quality, plant health.

1. SARRERA

Urbanizazio azkarrak, populazio-igoera eta garapen ekonomiko sostengaezinak gizakiek eta industriek sortutako hondakin-uren ugaritzea ekarri du. Etxeko hondakin-uren % 56a bakarrik modu seguru batean tratatzen da, gainerako % 46a, aldiz, tratamendu egokirik gabe ingurumenara itzultzen da (UN Habitat & WHO, 2021). Ur-ingurunekeo kutsadura giza jardueren larriagotutako arazo kritikoa da, eta horrek ur-masak eutrofizaziotik babesteko premia nabarmendu du (Hao *et al.*, 2024). Arazketa-metodo fisiko-kimiko konbentzionalak ekonomikoki garestiak dira eta ingurunean eragin negatiboa izan dezakete (Bharagava & Saxena, 2020). Naturan Oinarritutako Konponbideak (NOK), hala nola, fitoarazte-sistemak (FS), aldiz, kostu txikia eta jasangarritasun handia eskaintzen dute. Testuinguru honetan, NOK-ek, FS-ek bereziki, garrantzia hartu dute klima-aldaketaren eta biodibertsitate-galeraren erronkei aurre egiteko estrategia eraldatzaile gisa (Osaka *et al.*, 2021).

Hezegune artifizialak bezalako FS-ek hondakin-urak tratatzeko teknologia iraunkor gisa erabiltzen dira. Azpiegitura horiek hezegune naturalen funtzioak imitatzen dituzte, landare hidrofitoak, substratuak eta mikroorganismoak erabiltzaileak (Agaton & Guila, 2023), eta mantenugaiak edota kutsatzaileak modu jasangarrian murriztea ahalbidetzen dute, ur-gorputz hartzaileetara isuri aurretik (Kumar & Dutta, 2019). Hori horrela izanik, hainbat iturritatik datozen urak tratatzeko erabil daitezke, udal (Saeed *et al.*, 2022), nekazaritza (García-Herrero *et al.*, 2022), eta industriaren (Rana & Maiti, 2020) hondakin-urak esaterako.

Azken hamarkadetan, landa-eremu isolatuen hondakin-urak tratatzeko sistema deszentralizatuak geroz eta erabilgarriagoak dira, adibidez, Erreaktore Biologiko Sekuentzialak (EBS) eta bioiragazkiak, kostu txikiko aukerak baitira. Sistema horiek komunitate bakoitzaren behar espezifikoetara eta tokiko baldintzetara egoki daitezke, baita paisaia integratu ere. Horren harira, Bilbao Bizkaia Ur Patzuergoak (BBUP-ak) baliozkatu du ohiko bigarren mailako teknologiek, hala nola EBS eta bioiragazkiek, ez dutela beti

bermatzen tratatutako hondakin-uren isurketarako legezko mugak beteko direnik, bereziki nitrogeno (N) eta fosforo (P) kontzentrazioei dagokienez. Horregatik, NOK-ak, hala nola FS-ak, bigarren mailako tratamenduetatik eratorritako hondakin-uren N eta P kargak murrizteko alternatiba eraginkorrak dira. Hala ere, landa-ingurunean ezarri aurretik FS esperimentalak baldintza kontrolatuetan diseinatzea eta ezartzea funtsezkoa da, horien dinamika eta eraginkortasuna ebaluatzeko eta ingurune naturaletan ezartzeko datuak eskuratzeko. Horri esker, sistemaren diseinua eta osagaiak optimiza daitezke, hala nola landare-espezieak, substratuak eta baldintzak, landa-eremuetan ezarpena arrakastatsua izan dadin.

Azken urteotan, FS-en inplementazio-kasu arrakastatsuak dokumentatu dira, hala nola, hondakin-uretatik mantenugai mineralak (Mozaffari *et al.*, 2021), metal astunak (Gupta *et al.*, 2019), materia organikoa eta bestelako konposatu toxikoak deuseztatzeko (Dehghani *et al.*, 2024). Aipatutako ikerketek erakutsi dute erabiltzen diren landare-espezieen hautaketa gakoa dela arazketa eraginkorra bermatzeko. Gainera, zenbait espezieren konbinazioak nabarmen hobe dezake arazketa. Zhu *et al.* (2018)-ek adierazi zuten landare mota anitz erabiltzeak hondakin-uren tratamenduaren eraginkortasuna nabarmen hobetzen duela, nitrogeno (N) eta fosforo (P) bezalako mantenugaien % 90etik gorako murrizpen-tasekin. Espezie emergenteak eta urperatuak dira erabilienak, eta tokiko baldintzetara egokituta egon behar dira. *Typha* (Su *et al.*, 2019), *Carex* (Maucieri *et al.*, 2020) eta *Ceratophyllum* (Mahdi Al-Nabhan & Al-Abbawy, 2021) bezalako espezieak FS-etan aukeratu ohi dira, haien hazkunde eta mantenugai mineralak uretatik ezabatzeko gaitasuna dela eta.

Fitoarazte-sistemen funtzionamenduaren ebaluazio integrala hondakin-uren kalitatea zein landareen egoera fisiologikoa kontuan hartuta egin behar da. pH-a, konduktibitate elektrikoa, N totala (Nt), P totala (Pt), Oxigeno-Eskari Kimikoa eta Biologikoa (OEK eta OEB) funtsezko parametroak dira arazketa-gaitasuna neurtzeko (Moretti *et al.*, 2024). Bestalde, landareen adierazle fisiologikoez, hala nola biomasa, klorofila-edukia eta fluoreszentsia, eta pigmentu fotosintetikoaren profila, haien estres-maila eta errendimendua islatzen dute, eta, beraz, kudeaketarako tresna osagarri gisa erabil daitezke (Shelef *et al.*, 2011).

Fitoarazte-sistemek potentzial handia duten arren, oraindik ikerketa falta da landa-eskalan errutinaz inplementatzeko, eta politiken zein enpresa-sektoreen arteko koordinazioa behar da inpaktu eraldatzaileak izan ditzaten (Hald-Mortensen, 2024). Horien optimizazioan oraindik ere ezagutza-hutsuneak daude, eta erronka hori landu nahi du GrAL honek. Izan ere, ezagutza berriak eskainiko ditu FS esperimentalen diseinuan eta aplikazioan, ingurumen-jasangarritasuna sustatzeko eta klima-aldaketaaren mitigazio zein adaptazioan ekarpena egiteko.

2. HIPOTESIA ETA HELBURUAK

Aurretiazko ikerketetan oinarrituta, lan honetan hipotesi hau planteatzen da: landare-espezie hidrofitoen konbinazioan oinarritutako FS-ek, baldintza kontrolatuen pean, mantenugai mineralak (batez ere, N eta P) ezabatzeko eraginkortasuna handia erakusten dute.

Ikerketa-lan honen helburu nagusia da hondakin-urak tratatzeko FS experimental bat garatzea, tratatutako uretako nitrogeno- eta fosforo-kontzentrazioek ibai-ibilguetan isurtzeko indarrean dagoen legeriak ezarritako mugak gainditzen ez dituztela bermatzeko. Horrekin batera, hurrengo helburu espezifikoak ezarri dira: (1) FS experimental eraginkorra diseinatzea eta eraikitzea, landare-espezie hidrofitoak eta substratu egokiak hautatuta, tokiko baldintzetan arazteko ahalmena maximizatzeko; (2) hondakin-uren ezaugarri fisiko-kimikoak monitorizatzea denboran zehar, FS-ren arazketa-eraginkortasuna ebaluatzen; eta (3) landareen osasuna ebaluatzea parametro ekofisiologikoen bitartez.

3. MATERIALA ETA METODOAK

3.1. Diseinu experimental

Fitoarazte-sistamarako hiru landare-espezie aukeratu ziren: zintabelarra (*Typha* sp., "T"), sasi-zikperoa (*Carex riparia*, "Cx") eta azeri-buztana (*Ceratophyllum demersum*, "Ct"). Zintabelarrak "Vivero Vetiver" haztegia lortu ziren (<https://www.viverovetiver.com/>). Sasi-zikperoak eta azeri-buztanak "Vivero Plantas Acuáticas" haztegitik hartu ziren (<https://www.plantasacuaticas.org/>). Berotegiko baldintzak esperimentuan zehar hauek izan ziren: fotoperiodo naturala, argi osagarriekin osatua, 16 ordu argi/8 ordu iluntasuna; egunez 24°C eta gauez 18°C; hezetasun erlatiboa % 55/65 goizez/gauez, hurrenez hurren.

Guztira, 21 erretilu experimental ezarri ziren (33,5 x 23,5 x 21 cm), 6 tratamendutan banatuta (3 erreplika bakoitzeko): *Typha* sp. ("T"), *Carex riparia* ("Cx"), *Ceratophyllum demersum* ("Ct"), T+Ct, Cx+Ct eta T+Cx+Ct konbinazioak, eta landararik gabeko 3 kontrol. Substratu gisa marmolina zuria (8 x 16 mm) erabili zen, landareen egonkortasuna eta sistemaren iragazkortasuna bermatuta. Unitate experimental bakoitzeko landare-kopurua bakoitzaren pisu freskoaren (PF) arabera doitu zen: T espezieko 3-4 ale ($226 \pm 3,0$ g), Cx espezieko 6-8 ale ($194 \pm 2,7$ g), eta erretilu bakoitzeko Ct espezieko 150 g biomasa fresko. Horrela, tratamendu bakoitzaren barruan biomasa-homogeneotasuna bermatu zen. Azeri-buztana (Ct) landareen kasuan, oinarrian eta alboetan zuloak zituzten loreontzietan jarri ziren, uraren zirkulazioa errazteko. Hondakin-uraren bolumena unitate experimental bakoitzean 7 L-koa izan zen. Esperimentuak bost aste iraun zuen. Landareak antolatu ondoren, hondakin-ura

gehitu zen loreontzi zulatuak erabat estali arte. Ikerketa EHUko SGiker berotegian garatu zen.

3.2. Fitoarazte-sistemako hondakin-uren kudeaketa eta laginketak

Esperimentuan erabilitako hondakin-ura 2025eko otsailaren 11n jaso zen BBUP-ak kudeatzen duen Bilboko Buia auzoko hondakin-uren araztegian ($X = 506938.132$ m, $Y = 4786057.940$ m). Laginak aurreko egunetan prezipitaziorik gabe egon ondoren hartu ziren, euri-uren ondorioz hondakin-ura diluitzea saihesteko eta horren ezaugarrien adierazgarritasuna bermatzeko. Guztira 250 L hondakin-ur hartu ziren.

Buiako araztegia 200 biztanleko gehieneko populazioari zerbitzua eskaintzeko diseinatuta dago; batez besteko tratamendu-emia $69 \text{ m}^3/\text{egunekoa}$ da, eguneko N-zama $3,6 \text{ kg-koa}$ eta Oxigeno-Eskari Kimikoa (OEK) 160 ppm-koa . Arazketa-prozesua tratamendu biologiko konbentzional batean oinarritzen da, bi bioiragazki-unitaterekin osatua, eta, ondoren, dekantazio-etapa bat. Uraren bilketa irteera-hodi batetik egin zen. Ura hartzeko mahuka bati lotutako erauzketa-ponpa bat erabili zen, eta horri esker biltegiatze-bidoiak bete ahal izan ziren. Buiako araztegiaren hondakin-urak aukeratu ziren populazio txiki eta sakabanatutako arazketa-sistemetan bioiragazkiak instalatu ondoren sortutako arazoekin duten antzekotasunagatik.

Behin esperimentua abian jarrita, astero ur desionizatua gehitu zen tratamendu bakoitzera lurrunketa eta transpirazio bidezko ur-galerak birjartzeko. Esperimentuaren 14. eta 28. egunean, hondakin-uren laginak jaso ziren loreontzi zentralen hondotik. Egun horietan, laginak jaso ostean, hasierako hondakin-uraren 500 mL gehitu zen tratamendu bakoitzean, aldizkako deskarga berri bat simulatuz. Astero, ausaz aldatu ziren erretiluen kokapena.

Hasierako (T0) eta tarteko analisientzako (T14, T28) hondakin-uren 500 mL-ko laginak hartu ziren haien ezaugarri fisiko-kimikoak laborategian aztertzeko, ur-kalitatea monitorizatuz (**3.3. atala**). Hasierako (T0) eta bukaerako (T40) hondakin-uren 2 L-ko laginak hartu eta ganbara-hotzan mantendu ziren analizatu arte. Hondakin-uren hasierako eta bukaerako karakterizazio fisiko-kimiko osoa Fraisoroko nekazaritza-ingurumen laborategiak bideratu zuen. Azken egunean ere landare-laginak hartu ziren haien osasuna ebaluatzeko (**3.4. atala**).

3.3. Hondakin-uren kalitatearen egoeraren determinazioa

3.3.1. Ur-kalitatearen adierazle fisiko-kimikoak monitorizazio-etapan

Ur-kalitatea ebaluatzeko, honako parametro fisiko-kimiko hauek hautatu ziren: pH-a, konduktibitatea, nitrogeno totala (Nt), fosforo totala (Pt), Oxigeno-Eskari Kimikoa (OEK) eta Oxigeno-Eskari Biologikoa (OEB). Parametro horiek aukera ematen dute FS-aren

eraginkortasuna azkar ebaluatzeko eta diseinua doitzen joateko. GrAL honi esker, ondoren deskribatzen den metodologia ezarri eta optimizatu ahal izan da; horrek ikerketataldearentzat berrikuntza bat ekarri du.

Alde batetik, pH-a eta konduktibitate elektrikoa neurtu ziren laborategiko baldintza konstanteetan. pH-aren neurketak pH-metro (HI2004-02 Edge) erabiliz egin ziren; konduktibitatea, aldiz, konduktibimetro (HI5321) baten bidez. Bestetik, Nt, Pt, OEK eta OEB, lehenengo eguneko (T0), 14. eguneko (T14) eta 28. eguneko (T28) ur-laginen azterketa analitikoak fotometro multiparametrikoa (HI83399) erabiliz egin zen. Neurketak "Hanna Systems"-eko dagokion erreaktibo kit komertzialarekin egin ziren fabrikatzailearen protokolo estandarrak jarraituz.

Mantenugaien kontzentrazio totalak, Nt eta Pt, FS-aren mantenugaien ezabapen-tasak neurtzeko erreferentziazko parametroak dira. T0, T14 eta T28-an nitrogeno totalaren kontzentrazioa azido kromotropikoaren metodoa (HI94767A-50) erabiliz neurtu zen, eta fosforo totalarena, aldiz, fabrikatzaileak egokitutako azido banadomolibdofosforikoaren metodoa (HI94763B-50) erabiliz neurtu zen. Esperimentuaren amaieran (T40), aldiz, nitrogeno inorganiko totalaren, nitritoaren, nitratoaren, amonioaren eta fosfatoaren kontzentrazioak Fraisoroko laborategiak eginiko analitikan oinarritu ziren, Eranskinean adierazita daudenak (**1E. taula**). Monitorizazio-etapan, T14 eta T28-an, nitrogeno eta fosforo totalaren murrizpen erlatiboa kalkulatu ziren, eta T40-ko datuekin, nitrogenoaren forma inorganikoen eta fosfatoaren murrizpen erlatiboa kalkulatu ziren. Kalkulu horiek egiteko erabilitako formulak Eranskinetan kontsulta daitezke (**2E. formula**).

Laginen karakterizazio fisiko-kimikoa osatzeko, OEK eta OEB parametroak hondakin-uren araztegien eraginkortasuna ebaluatzeko erabiltzen dira, biak materia organikoaren degradazio-tasen adierazleak baitira (Lotfi *et al.*, 2019). OEK-ren bitartez, uretan dauden materia oxidagarrien estimazio bat egin daiteke, hau da, materia horiek oxidatzean kontsumitzen den oxigenoaren kantitatea (Fernández *et al.*, 2004). Neurketa dikromato metodoa erabiliz burutu zen, protokoloan (HI94754F-25) deskribatutakoaren arabera. OEB parametroak, ordea, degradazio biologikorako behar den oxigeno-eskakizun erlatiboak zehazten du (Fernández *et al.*, 2004). Horretarako, disolbatutako oxigeno-kontzentrazioak (DO) 1. eta 5. egunetan neurtu ziren, laginak 20°C-tan eta ilunpean inkubatuz 5 egunez. Inkubazioa eta gero, mikroorganismo aerobikoek materia organikoa degradatzean sisteman dagoen oxigeno zati bat kontsumitu zuten. DO-aren neurketa fabrikatzaileak egokitutako Winklerren metodoa erabiliz aurrera eraman zen eta OEB kalkulurako 1. eta 5. eguneko DO balioen kenketa egin zen ($DO_{T0} - DO_{T5}$).

3.4. Landareen osasunaren determinazioa

3.4.1. Parametro biometrikoak: landareen biomasa

Landareen biomasa neurtzea funtsezkoa da hazkundera eta arazketa-efizientzia ebaluatzeko. Hasierako landareen laginak pisatu ziren (pisu freskoa, PF), eta esperimentuaren ondoren laginak labean sikatu ziren 80°C-tan 48 orduz, pisu lehorra (PL) lortzeko.

3.4.2. Parametro fisiologikoen determinazioa

Hostoetako klorofila-eduki erlatiboaren adierazle gisa SPAD balioak erabilgarriak dira, klorofila-maila jarduera fotosintetikoaren adierazlea baita. Horregatik, klorofila-eduki erlatiboa neurtzeko SPAD klorofila-fluorimetroa (SPAD-502+) erabili zen. Tratamendu bakoitzeko, espezie bakoitzaren hosto gazte zabalduetan hiru neurketa egin ziren, 24°C-tan. Bestalde, klorofilaren fluoreszentziaren neurketa gakoa da aparatu fotosintetikoaren (II. fotosistemaren) eraginkortasunari buruzko informazioa lortzeko, landarea suntsitu gabe eta modu azkar batean. OJIP metodoa erabili zen fluorimetro (FluorPen FP 110; Photon Systems Instruments, Drasov, Txekiar Errepublika) baten laguntzaz. Neurketak, landareen hosto gazte zabalduetan egin ziren iluntasun-baldintzetan eta 24°C-tan (Encinas-Valero *et al.*, 2022). F_v/F_m (II. fotosistemaren eraginkortasun maximoa), P_{iAbs} (II. fotosistemaren errendimendu-indizea), ϕE_o (elektroi-transferentziaren errendimendu kuantikoa) eta ϕDo (disipatutako energia-frakzioa) parametroak aztertu ziren.

Pigmentu fotosintetikoak (klorofilak, karotenoak eta xantofilak) eta antioxidatzaile lipofilikoak (tokoferolak) landare-osasunaren adierazleak ere badira. Lehenak fotosintesi-gaitasunarekin eta fotobabesarekin zuzenki daude erlazionatuta. Bigarrenak estres oxidatiboaren aurkako babesa eskaintzen dutenez, haien kontzentrazioaren igoerak estresa adierazi dezake. Horien determinaziorako landare tratamendu bakoitzaren landare-espezie bakoitzetik (*T*-eta *Cx*-etan) 3 mm diametroko 6 disko hartu ziren edo biomasa zati jakin bat (*Ct*-etan), nitrogeno likidoan hoztuz eta -80°C-tan gordez erauzketa egin arte. Pigmentuen erauzketarako Lacalle *et al.* (2020) deskribatutako prozedura erabili zen. Ultra Errendimenduko Kromatografia Likidoa (UPLC, Acquity™ uHPLC H-Class system, Waters®, Milford, USA) erabili zen klorofilen (a+b), karotenoen, xantofilen (biolaxantina, V; anteraxantina, A; eta zeaxantina, Z) eta tokoferolen kontzentrazioa zehazteko.

3.5. Datuen tratamendu estatistikoa

Datuak *IBM SPSS Statistics 29* programa estatistikoaren bidez aztertu ziren. Levene testa aplikatu zen bariantzen homogeneotasuna ebaluatzeko eta Kolmogorov-Smirnov normaltasuna frogatzeko. Eredu lineal orokorra erabili zen suposizioak betetzen zirenean,

eta Kruskal-Wallis proba ez-parametrikoa betetzen ez zirenean. Lan honetan aurkeztutako grafikoetan tratamendu bakoitzerako ezarritako erreplika independenteen ($n=3$) batezbestekoak eta errore estandarrak aurkezten dira. Izartxoak ezberdintasun esangarriak daudela adierazten du; hizki ezberdinak dituzten tratamenduen artean ezberdintasun esangarriak daude ($p < 0,05$), eta hizki berdinak dituztenen artean, aldiz, ez da halakorik hauteman ($p > 0,05$).

4. EMAITZAK

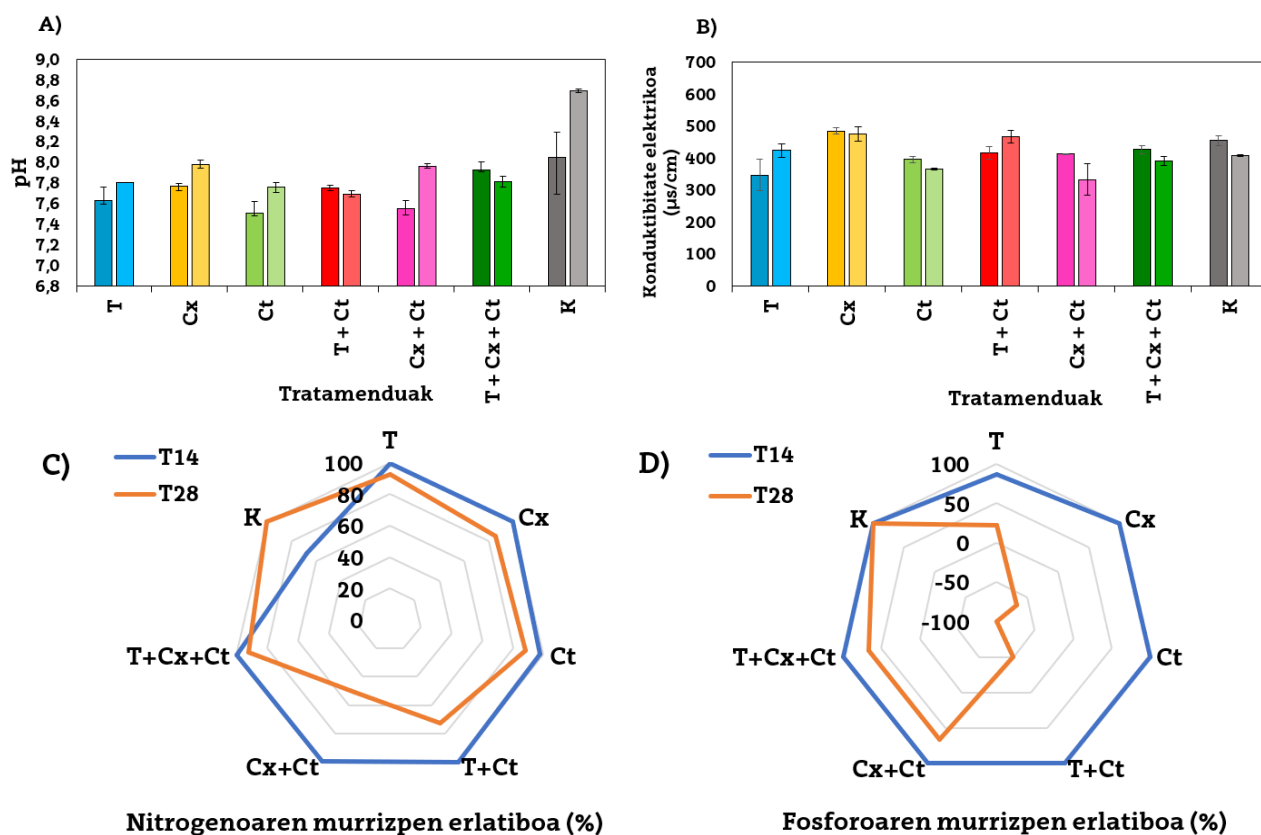
4.1. Fitoarazte-sisteman erabilitako hondakin-uren karakterizazioa

Hasierako hondakin-uraren karakterizazio fisiko-kimikoa Fraisoroko Zerbitzu Analitikoak erabilia egin zen. Hondakin-uretan erregistratutako pH-a 6,9 izan zen; konduktibitatea, berriz, 668,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ra iritsi zen. Nitrogeno inorganikoaren eta fosfatoen kontzentrazioak 20,9 mg/L eta 9,4 mg/L izan ziren, hurrenez hurren; horrek baieztatu zuen eutrofizatzaileak izan daitezkeen mantenugaien karga handia zela. Oxigeno-Eskari Kimikoari (OEK) dagokionez, 31,7 mg/L-ko balioa zehaztu zen, eta horrek konposatu organiko eta oxidagarriak daudela adierazi zuen. Oxigeno-Eskari Biologikoa (OEB), berriz, 8,7 mg/L izan zen, eta hondakin-uretan zegoen material organiko biodegradagarriaren maila adierazi zuen. OEB/OEK 0,27 izanik, materia organikoaren zati txiki bat bakarrik biodegradagarria dela ondoriozta daiteke. Eranskinean hasierako karakterizazioaren emaitzak biltzen dira (**3E. taula**).

4.2. Fitoarazte-tratamenduen eragina uraren kalitatean monitorizazio-etapan

Esperimentuaren monitorizazio-etapan (T14 eta T28), pH eta konduktibitatean ez zen ezberdintasun esangarririk detektatu. Oro har, pH-a handitu zen denboran zehar, batez beste 0,2-0,4 unitate; $T+Ct$ eta $T+Cx+Ct$ tratamenduetan izan ezik, non 0,06 eta 0,11 unitate murriztu zen. Kontrolak 0,65-ko emendioa izan zuen (**1A. irudia**). Konduktibitateak, berriz, behera egin zuen (10-80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ko murrizpena), T eta $T+Ct$ tratamenduetan izan ezik (77 eta 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ko murrizpena, hurrenez hurren) (**1B. irudia**).

Gainera, N eta P-en murrizpen erlatiboak kalkulatu ziren. 14. egunean, nitrogenoaren murrizpen erlatiboa % 100-koa izan zen tratamendu guztietan, landarerik gabeko tratamenduan (kontrolean) izan ezik (% 68). 28. egunean, murrizpena txikiagoa izan zen tratamendu guztietan, bereziki $Cx+Ct$ tratamenduan % 51,2-ra jaitsi zen, eta kontrolean, aldiz, % 100-ko murrizpena lortu zen (**1C. irudia**). Fosforoaren murrizpen erlatiboa 14. egunean ~% 100-koa izan zen, baina 28. egunean Cx , Ct eta $T+Ct$ tratamenduek murrizpen negatiboa erakutsi zuten (% -67, -100 eta -50, hurrenez hurren), hau da, sisteman kargan eman zena baino fosforo gehiago zegoen (**1D. irudia**).

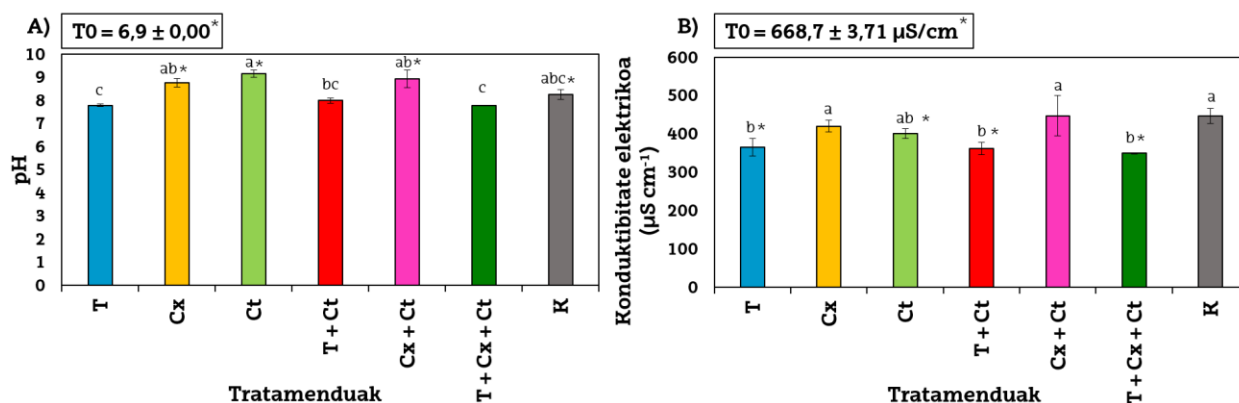


1. irudia. (A) pH, (B) konduktibitate elektrikoa ($\mu\text{S}/\text{cm}$), (C) nitrogeno (N) eta (D) fosforoaren (P) murrizpen erlatiboa (%) 14. eta 28. egunetan (T14 eta T28) tratamendu eta kontroletan, kolore ilunez eta argieiz; eta lerro urdinez eta laranjez adierazita, hurrenez hurren. T: *Typha sp.*; Cx: *Carex riparia*; Ct: *Ceratophyllum demersum*; T+Cx: *Typha* eta *C. riparia* batera; Cx+Ct: *C. riparia* eta *C. demersum* batera; T+Cx+Ct: hiru landare-espezieak batera; K: kontrola (landaririk gabe). Akronimo hauek hurrengo irudietan ere erabiliko dira.

Monitorizazio-etapako 14. egunean (T14) OEK eta OEB parametroak ere neurtu ziren. Lortutako emaitzek ez zuten interpretazio fidagarriarik ahalbidetu, batez ere OEB kasuan. Parametro horien determinaziorako erabilitako prozedimenduak ezin izan ziren guztiz optimizatu; hortaz, datu horiek ez dira grafikoetan sartu (datu ez aurkeztuak). Hala ere, OEK eta OEB ez zituzten isurpen-atalaseak gainditzen.

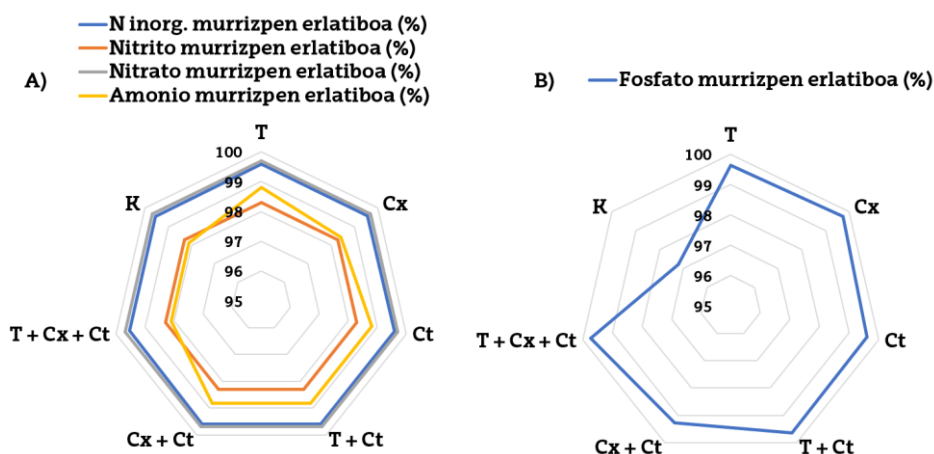
4.3. Fitoarazte-sistemen eragina uraren kalitatean esperimenduaren amaieran

Esperimentuaren amaieran, 40. egunean (T40), pH eta konduktibitatean ezberdintasun esangarriak egon ziren hasierako hondakin-urarekin konparatuz gero (T0). Hondakin-uraren hasierako pH balioa 6,9 izan zen. 40 egunera, pH-a tratamendu guztietan emendatu zen, 0,9-2,27 igoerekin; igoera handiena Ct izanik (2,27). Kontrolean, igoera txikiagoa izan zen (0,4) (**2A. irudia**). Konduktibitateari dagokionez, ezberdintasun esangarriak ere egon ziren; hasieran (T0) 668,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -koa izan zen eta 40 egunera tratamendu guztiek murrizpen nabarmena erakutsi zuten (221-319 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ko murrizpena), T, T+Ct eta T+Cx+Ct tratamenduek murrizpen nabarmenenak agerian zituztelarik (303, 307 eta 319 $\mu\text{S}/\text{cm}$, hurrenez hurren) (**2B. irudia**).



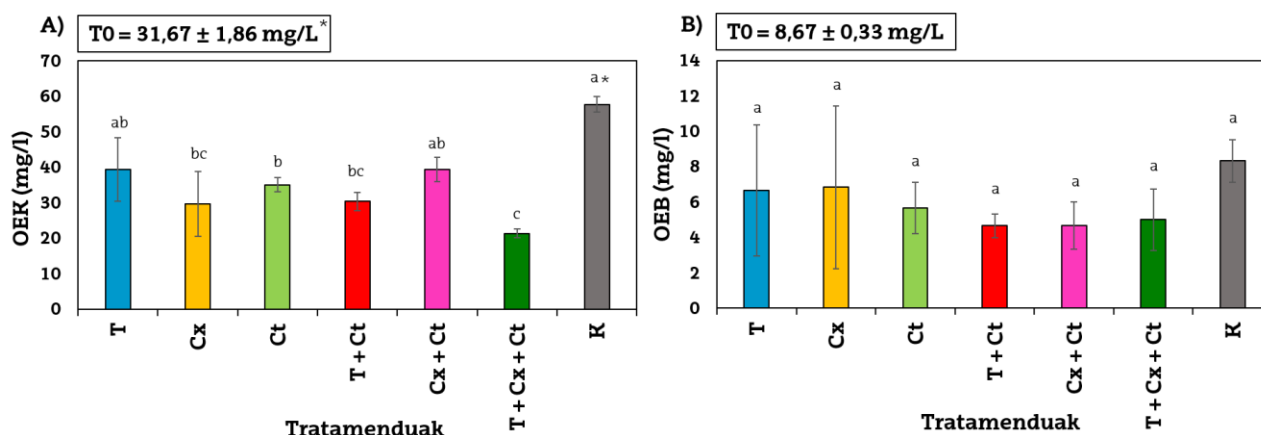
2. irudia. pH eta konduktibitate elektrikoaren batezbesteko balioa 40. egunean (T₄₀) tratamendu eta kontrolean (landarerik gabe, substratua soilik). (A) pH, (B) konduktibitatea (μS/cm). Goialdeko laukian hasierako hondakin-uraren balioak aurkezten dira. Ikur estatistikoaren esanahia 3.5. atalean kontsulta daiteke.

Nitrogenoari dagokionez, tratamendu guztiek eta kontrolak murrizpen handiak erakutsi zuten (% 97-100 bitartekoa), N inorganikoari eta nitratoari dagokiela bereziki. Nitrito eta amonioaren murrizpena, aldiz, zertxobait txikiagoak ziren (% 98) (**3A. irudia**). Fosfatoaren murrizpena ere altua izan zen tratamenduetan (% 99-100) zein kontrolean (% 97) (**3B. irudia**).



3. irudia. Mantenugaien murrizpen erlatiboak (%) 40. egunean (T₄₀) tratamendu eta kontrolean. (A) N inorganikoaren, nitratoaren, nitritoaren eta amonioaren murrizpen erlatiboak. (B) Fosfatoaren murrizpen erlatiboa.

Oxigeno-Eskari Kimikoaren eta Biologikoaren mailak T₄₀-n aldaketak izan zituzten hasierako hondakin-urarekiko (T₀), baina oro har, ezberdintasunak ez ziren esangarriak izan. OEK-ren kasuan 31,67 mg/L-ko baliotik abiatuta (T₀) T, Ct eta Cx+Ct tratamenduetan emendatu zen (7,7, 3,3 eta 7,7 mg/L-ko emendioak) eta besteetan murriztu zen, T+Cx+Ct tratamenduak murrizpen handiena izan zuelarik (10,33 mg/L-ko murrizpena) (**4A. irudia**). OEB-an, aldiz, tratamendu guztiek 1,83-4 mg/L-ko jaitsierak izan zituzten T₀-rekiko, T+Ct, Cx+Ct eta T+Cx+Ct konbinazioek murrizpen nabarmenenak erakutsita (4, 4 eta 3,67 mg/L-ko murrizpenak) (**4B. irudia**).

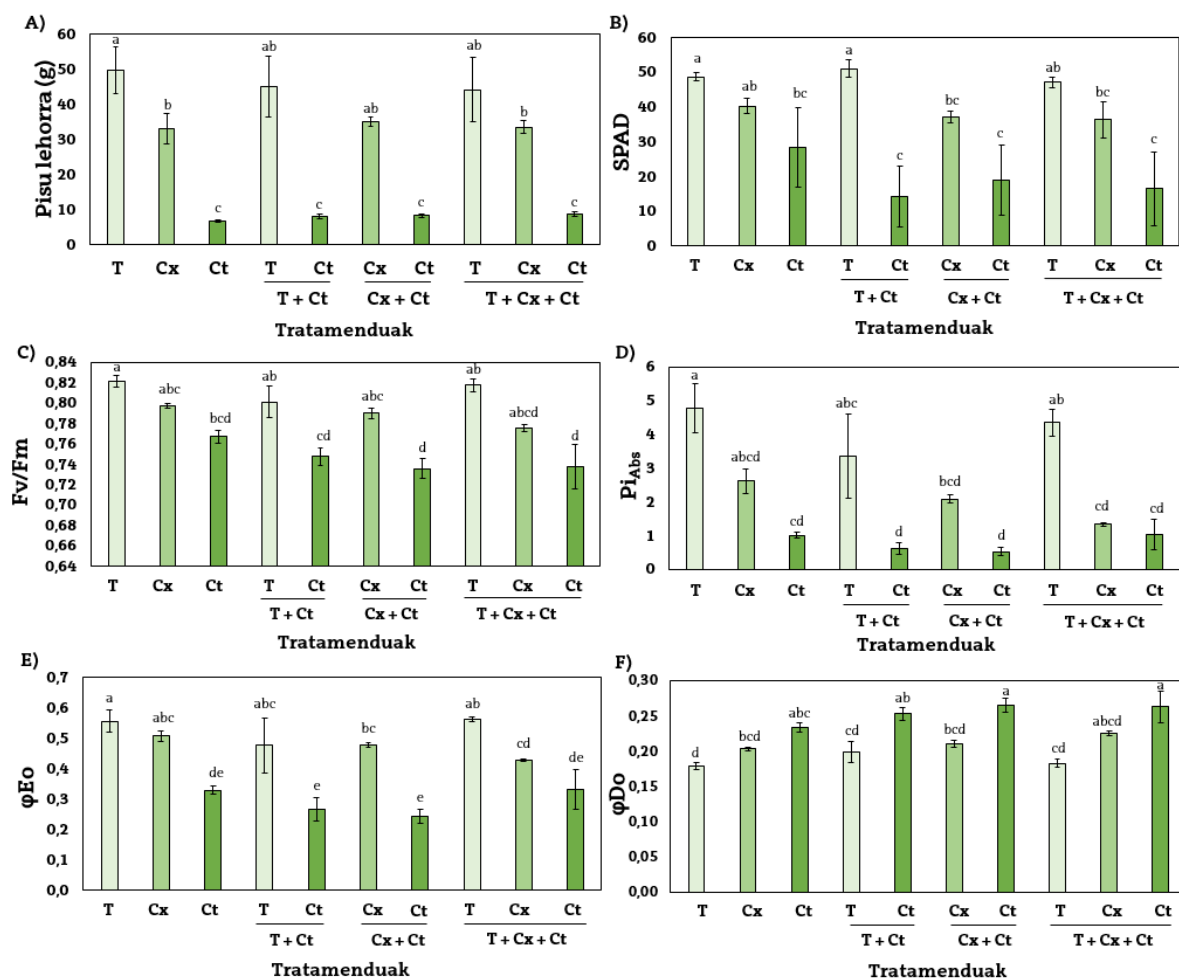


4. irudia. (A) Oxigeno-Eskari Kimikoa (OER) eta, (B) Biologikoa (OEB) balioen batezbestekoa 40. egunean (T40) tratamenduetan (mg/L). Goialdeko laukian hasierako hondakin-uraren balioak aurkezten dira.

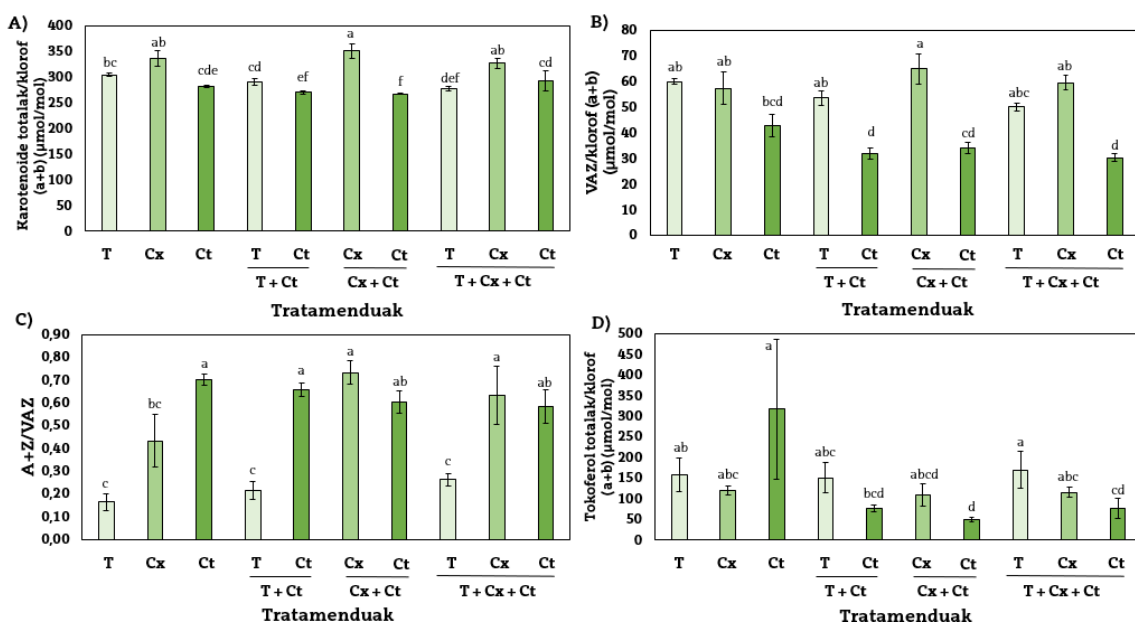
4.4. Landareen osasun-egoera fitoarazte-esperimentuaren amaieran

Zintabelarrak (T) pisu lehor handiena ekoiztu zuten landareak izan ziren ($46,6 \pm 1,7 \text{ g}$), eta ondoren sasi-zikperoak (Cx; $33,7 \pm 0,6 \text{ g}$) eta azeri-buztanak (Ct; $7,9 \pm 0,5 \text{ g}$), hurrenez hurren (**5A. irudia**). Era berean, SPAD balioek antzeko joera erakutsi zuten: klorofila-maila erlatiborik altuena T-dun tratamenduetan neurtu zen (48,9), eta hori baino 11,1 unitate txikiagoa izan zen Cx-dun tratamenduetan (37,8), eta azkenik, 29,4 unitate txikiagoa Ct-dun tratamenduetan (19,48) (**5B. irudia**). Landare osasuntsu batean Fv/Fm erreferentziazko balioa 0,8 ingurukoa da, eta honek adierazten du landareari iristen zaion energia gehiena fotosintesia egiteko erabiltzen duela. Oro har, tratamendu guztiek 0,8 inguruko balioak izan zuten; T-dun eta Cx-dun tratamenduek balio altuenak lortu zituzten (0,78-0,82) (**5C. irudia**). Errendimendu fotosintetikoari erreparatuz gero (P_{iAbs}), T-dun tratamenduek izan zituzten baliorik handienak (3,4-4,8), ondoren Cx-dunek (1,3-2,6), eta azkenik, Ct-dunek (0,5-1) (**5D. irudia**). Antzeko joera ikusi zen ϕE_o parametroan, non T-dun tratamenduek baliorik altuenak erakutsi zituzten (0,5-0,6) (**5E. irudia**). Energia-disipazioaren errendimendu kuantikoak (ϕDo) alderantzizko joera erakutsi zuen: Ct-dun tratamenduek, batez ere tratamendu konbinatuetan, baliorik altuenak izan zituzten (0,25-0,26), ondoren, Cx-dunek (0,2-0,23) eta, azkenik, T-dunek (0,18-0,2) (**5F. irudia**).

Egoera fisiologikoaren azterketa osatzeko, pigmentu fotosintetikoak analizatu ziren; horietan oro har, ez zen ezberdintasun esangarririk antzeman espezie bereko tratamenduen artean. Karotenoide totaletan lortutako batezbesteko balioak hurrengoak izan ziren: 326-351 Cx-n, 277-304 T-n, eta 267-292 $\mu\text{mol/mol}$ Ct-n (**6A. irudia**). Bestalde, xantofilen zikloko pigmentuen kontzentrazioa 50-60 $\mu\text{mol/mol}$ artean egon zen T-n, 57-65 Cx-n eta 30-43 Ct-n (**6B. irudia**). A+Z/VAZ proportzioa 0,16-0,26 $\mu\text{mol/mol}$ artean egon zen T-n, 0,43-0,73 Cx-n eta 0,58-0,7 Ct-n (**6C. irudia**). Azkenik, tokoferolen kasuan ez zen espezie bereko tratamenduen arteko ezberdintasun esangarririk behatu (**6D. irudia**).



5. irudia. Landareen parametro biometriko eta fisiologikoak 40. egunean (T40), espezie eta tratamendu ezberdinetan. (A) Pisu lehorra (g), (B) SPAD (klorofila-eduki erlatiboa), (C) Fv/Fm (II. fotosistemaren eraginkortasun maximoa), (D) PiAbs (II. fotosistemaren errendimendu-indizea), (E) φEo (elektroi-transferentziaren errendimendu kuantikoa) eta (F) φDo (disipatutako energia-frakzioa).



6. irudia. Pigmentu fotosintetikoaren eta tokoferolen profilak 40. egunean (T40), espezie eta tratamendu ezberdinetan. (A) Karotenoide totalak/klorofila (a+b) (μmol/mol), (B) VAZ/klorofila (a+b) (μmol/mol), (C) A+Z/VAZ, eta, (D) Tokoferol totalak/klorofila (a+b) (μmol/mol).

5. EZTABAIDA

Lan honetan aurkezten den FS-ren diseinu esperimentalari esker, hondakin-uren tratamendu tertziario gisa duen eraginkortasuna ebaluatu ahal izan zen, uraren kalitatearen monitorizazioa eta landare-espezieen adierazle ekofisiologikoen analisisia uztartuta. Zintabelarra (*Typha sp.*), sasi-zikperoa (*Carex riparia*) eta azeri-buztana (*Ceratophyllum demersum*) landareek, bai bakarka zein konbinazioetan, eta marmolinazko substratu inertearen erabilerak, nitrogenoa eta fosforoa hondakin-uretatik azkar ezabatzea erraztu egin zuen; eta bide batez, posiblea egin zuen ez bakarrik landare-landare eta landare-substratua arteko elkarreraginen azterketa, baita horiek sistemaren funtzionaltasunean zuten eragina ere.

5.1. Fitoarazte-sistemaren eraginkortasunaren ebaluazioa hondakin-uren kalitatearen adierazleen arabera

Hondakin-uren pH-ak eragin zuzena du fitoarazte-sistemen funtzionamenduan, batez ere nitrogenoaren ezabapenean (Almuktar *et al.*, 2018). Monitorizazio-fasean pH-an zein konduktibitatean gorabeherak egon ziren arren, joera orokorra pH-a handitzea eta konduktibitatea txikitzea izan zen (**1A eta B. irudia**). pH-aren eredu hori Su *et al.* (2019)-ek erakutsitakoarekin bat egiten du, pH-aren igoera aurkeztu baitzuten tratamendu gehienetan. Izan ere, pH egokiak (6-8 tartekoak) nitrifikazio eta desnitrifikazio prozesuak ahalbidetzen ditu (Almuktar *et al.*, 2018). Esperimentuaren amaieran, T40-an, pH-ak ezberdintasun esangarriak izan zituen hasierarekiko (**2A. irudia**), eta aldaketa hori azal daiteke ur-landareen jarduera fisiologiko eta biokimikoen eraginagatik. Izan ere, pH-a handitzea jarduera fotosintetikoarekin, mantenugaien xurgapenarekin eta substratuarekiko interakzioarekin lotutako hainbat mekanismo fisiologiko eta biokimikoren bidez azal daiteke. Alde batetik, landareek uretan dagoen karbono dioxidoa (CO_2) kontsumitzen dute, eta CO_2 -a urarekin orekan dagoenean azido karbonikoa sortzen denez, CO_2 -aren kontsumoa sistemaren azidotasuna murrizten du. Beste alde batetik, landareen NH_4^+ lehentasunezko xurgapena ere eragin dezake, OH^- askatzea ekar dezakeena, pH-a igoz. Azkenik, kontrolean ere handipena antzeman zen, marmolina eraginez izan daitekeena; kaltzio karbonatoz osatutako konposatu horrek uraren pH-a indargetzeko duen gaitasunari esker.

Bestalde, konduktibitate elektrikoa 40. egunera txikiagotu zen ezberdintasun esangarriekin (**2B. irudia**), uretan disolbatutako ioi kopuruaren murrizpena agerian. Gertaera hori mantenugaien xurgapenarekin, eta, beraz, fitoarazte-eraginkortasunarekin lotu daiteke, Salcedo *et al.* (2022)-ek azaldu zuten moduan. Zentzu horretan, pH-aren igoera eta konduktibitatearen jaitsiera erlazionatuta egon daitezke: landareek mantenugaiak

xurgatzean, solutu kopurua gutxitzen da, eta, aldi berean, CO₂-aren kontsumoak eta OH⁻ askapena pH-a igotzea ekartzen dute.

Buiako araztegiko efluentean detektatutako nitrogenoaren (22 mg/L) eta fosforoaren (3 mg/L) hasierako balioek ibai-ibilguetara isurtzeko ezarritako atalaseak gainditzen zituzten, indarrean dagoen legeriaren arabera (10 mg/L N eta 1 mg/L P) (erregulazio hori 91/271/EEE Zuzentarauan jasotzen da, eta Estatu mailan 509/1996 Errege Dekretuan).

Mantenugaien emaitzek erakusten dute FS-k eraginkortasun handia duela mantenugai inorganikoak ezabatzeko, bereziki forma nitrogenatuak eta fosfatoak. Tarteko monitorizazioaren 14. egunean, N eta P-aren murrizpen erlatiboak osoak izan ziren tratamendu guztietan (~%100) (**1C eta D. irudia**), horrek fitoarazte-gaitasun maximoa islatzen du. Gertaera hori Su *et al.* (2019)-ek ere erakutsi zuten, esperimentuaren 16. egunetik aurrera N eta P kontzentrazioak % 80-90-eko murrizpena izan baitzuen.

Nitrogenoari dagokionez, T28-an, murrizpena txikiagoa zen tratamendu guztietan, bereziki Cx+Ct tratamenduan (**1C. irudia**). Hori, Białowiec *et al.* (2019)-en arabera, sistemaren asetasan baten ondorioa izan daiteke. Izan ere, nitrogeno-zama igo ahala, mikroorganismoen oxigeno-eskaria ere igotzen da, baina sisteman dagoen oxigenoaren kontzentrazioa ez da nahikoa izaten nitrogenoaren zikloko erreakzioak behar bezala gauzatzeko, eta, ondorioz, sistemaren mantenugaien fitoarazte-gaitasuna murrizten da. T40-an, nitrogenoaren forma guztiak murriztu zirenez, esperimentuaren amaieran fitoarazte-gaitasuna berreskuratu zela erakusten da (**3A. irudia**). T28 eta T40-ko kontroletan behatutako nitrogenoaren murrizpen erlatibo handiak (%97-100) marmolina substratua erabiltzearekin erlazioa daiteke. Material alkalino honek bakterio desnitrifikatzaileen hazkundera sustatu dezake, eta horrek nitrogenoaren galera eragin dezake desnitrifikazio-prozesuen bidez (Jiang *et al.*, 2022).

Fosforoari dagokionez, monitorizazio-etapan aldaketa esanguratsuak hauteman ziren. T14-an, ~% 100eko murrizpenak ikusi ziren tratamendu guztietan, baita kontrolean ere. Kontrolaren emaitza hori, neurri batean, behintzat, marmolina substratu gisa erabiltzeagatik azal daiteke. Izan ere, kaltzio karbonatoan aberatsa den marmolinak Ca²⁺ askatzen ditu, ortofosfatoekin erreakziona ditzaketenak, hauspeatzen diren kaltzio fosfatoak sortuz (Bouamra *et al.*, 2018). Su *et al.* (2019) ikerketaren arabera, efektu hori mikroorganismoen jarduerak ere erraz dezake.

Hala ere, T28-an, egoera aldatu zen: Cx, Ct eta T+Ct tratamenduetan murrizpena negatiboa zen, eta horrek esan nahi du fosforoaren kontzentrazioa altuagoa dela sartutakoarekin alderatuta (**1D. irudia**). Fenomeno hori honela azal daiteke: sistematik fosforoa askatzea, hainbat prozesuri egotz dakiekeena, hala nola sustraiak sistema itxietan deskonposatzea,

erretiluen hormetan alde zaureretik adsorbatutako fosforoa askatzea, biogerezetatik mobilizatzea, edo mikrokosmosean dagoen materia organikoa mineralizatzea; hala ere, ez dira baztertzen desbideratze analitikoak, lan egiten den kontzentrazio-tarte txikia dela eta. Kargatu ondoren esperotako P kontzentrazioa 0,20 mg/L-koa zen, baina tratamendu horietan neurtutakoa handiagoa izan zen (0,40 mg/L arte) (**5E. taula**). Horixe Su *et al.* (2019)-en ikerketan ere gertatu zen, non 11. egunean behin-behineko P igoera bat antzeman zen, ondoren berriro jaisteko. Era berean, T40-an, fosfatoaren murrizpen nabarmenak, sistemak, monitorizazio-fasearen ostean fosforoaren ezabatze-gaitasuna berriro lortu zuela iradokitzen du (**3B. irudia**).

Oxigeno-Eskari Kimiko (OEK) eta Biologikoan (OEB) lortutako emaitzak isurpen-atalasearen azpitik daude, hots, 125 eta 25 mg/L-tik behera, hurrenez hurren. T0 eta T40 artean, oro har, beheranzko joera ikusi bazen ere, ez zen ezberdintasun esangarririk antzeman (**4. irudia**). Horrek iradokitzen du esperimendu osoan zehar uraren oxigenazio baldintzak egonkorrak mantendu zirela, jarduera mikrobiarra zein fotosintetiko ohikoak islatuta. Beheranzko joera hori landareek mikrobio-komunitate aerobioen sustapenean duten zereginari egotz dakioke, sustraietatik oxigenoa errizosferara askatzearen ondorioz. Mikroingurune oxigenatu horrek bakterio nitrifikatzaileak eta materia organikoaren degradazio aerobioa egiten duten beste mikroorganismo batzuk ugaltzea errazten du. Gainera, sustrai-arkitekturak biogezuza mikrobiarrak sortzen laguntzen du, eta horrek handitu egiten du arazketan inplikaturako prozesu biokimikoetarako azalera aktiboa (Abdelhakeem *et al.*, 2016).

5.2. Fitoarazte-sistemaren eraginkortasunaren ebaluazioa landare-osasunaren adierazleen arabera

Landareen biomasaren ekoizpenean ezberdintasun esangarriak detektatu ziren tratamenduen artean, T-dun tratamenduek biomasa handiagoa erakutsi zutelarik (**5A. irudia**). Horrek esan nahi du *Typha sp.* baldintza esperimentaletara egokitzeko eta hazteko gaitasun handia izan zuela. Biomasa altuak sustrai-sistema eta aireko organoen garapen handiagoa dakar, xurgapen-gaitasuna areagotuta.

Parametro fisiologikoen azterketak erakutsi du T-dun tratamenduak (bakarka zein konbinatuta) izan direla egoera fisiologiko onena mantendu dutenak. Izan ere, SPAD eta efizientzia fotosintetikoaren parametro (F_v/F_m , P_i_{Abs} eta ϕE_o) altuagoak eta ϕDo balio txikiagoak izan zituzten. Azken parametro horrek bero-galera baxua dela adierazten du, eta horrek estres-maila txikiagoa iradokitzen du gainerako tratamenduekin alderatuta. Aldiz, Ct-dun tratamenduek efizientzia fotosintetiko baxuagoa eta bero-galera altuagoa erakutsi zuten, mekanismo fotobabesle gisa energia gehiago galdu behar duela azalduta. Ondorioz,

Ct da estres-maila handiena pairatu duen espeziea, edozein tratamendutan. Oro har, efizientzia fotosintetikoari dagokionez, gradiente bat ezarri zen: $T > Cx > Ct$, eta joera hori bat dator pisu lehorrean ikusitako patroiarekin, parametro fisiologikoen eta biometrikoen arteko erlazioa nabarmenduta. Azkenik, aipagarria da parametro guztietan (SPAD, F_v/F_m , $P_{i_{Abs}}$, ΦE_o eta ΦD_o), T eta Ct tratamenduen arteko ezberdintasunak esangarriak izan zirela, *Typha*-ren egokitzapen fisiologiko egokia azpimarratuz.

Pigmentu fotobabesleen (karoteno eta xantofilen) erlazioetan, espezie bereko tratamenduen arteko ezberdintasun esangarri ezak agerian uzten du hautatutako espezie bakoitzak, bakarka zein konbinatuta, ez duela estresik pairatu ezarritako baldintza esperimentaletan. Hortaz, konbinazioan landare-landare lehiarik gertatu ez dela ondorioztatu daiteke. Antioxidatzaileak diren tokoferolen kasuan, ez da espezie bereko tratamenduen arteko ezberdintasun esangarririk ikusi, baina bai, ordea, *Ct* tratamendu sinplean (errore estandarra oso altua izanik, baliteke analisi-akatsen bat egon izana). Horrela, pigmentu fotobabesleen erlazioek estres oxidatiborik ez dagoela erakusten dutenez, landareek tokoferolen biosintesi-bidezidorraren aktibazioa behar izan ez dutela esan daiteke.

5.3. Landareen aukeraketa, fitoarazte-sistemaren eraginkortasunaren gakoa

Landare-espezieen hautaketa funtsezkoa da FS-ren arrakastarako, hautatutako espezieek hondakin-uren mantenugaiak ezabatzeko gaitasuna izan behar dutelako. Azterlan honetan *Typha*, *Carex* eta *Ceratophyllum* erabili ziren, hezeguneetan ohikoak direlako eta, literaturaren arabera, mantenugaien xurgapenean eraginkorrak direlako (Su *et al.*, 2019; Maucieri *et al.*, 2020; Mahdi Al-Nabhan & Al-Abbawy, 2021). Espezieak aukeratzean, dibertsitate morfofuntzionalaren aldeko apustua egin zen. T eta Cx ur-landare emergenteak dira (*Typha*-k, adibidez, zenbait egokitzapen ditu: errizoma garatuak eta aerenkima duen sustrai-sistema). *Ct*, ordea, landare flotagarri eta oxigeno-ekoizle gisa ezaguna da. Aukeraketa horrek sistema eraginkorrago baten oinarriak ezartzen ditu, espezieen arteko osagarritasunaren bidez.

6. ONDORIOAK

Lan honetan aurkeztutako FS-ren diseinu esperimentalari esker, hondakin-uren tratamendu tertziario gisa duen eraginkortasuna ebaluatu ahal izan zen. Emaitzen arabera, hautatutako espezieek, banaka zein konbinatuta, eraginkortasun handia erakutsi zuten N eta P kontzentrazioak murrizteko, baita isurketa-atalaseek ezarritako mugen azpiko balioak lortzeko ere. Era berean, marmolina substratuak mantenugaien ezabapenean lagundu du.

Azpimarratzekoa da 14. eguneko N eta P murrizpen erlatibo totalek agerian utzi zutela tratamenduen laginketa-denborak laburtu daitezkeela, eta horrek garrantzia hartzen du prezipitazio urriko testuinguruetan, non hondakin-urek mantenugai-karga handiagoa izateko joera duten.

Fitoarazte-sistemen optimizaziorako, landare-dibertsitatearen aldeko apustua funtsezkotzat jotzen da. Landare-dibertsitate handiagoak errizosferako mikrobio-komunitate aberatsagoak sustatzen ditu, eta, ondorioz, mantenugaiak ezabatze bidezidor biokimikoen aukera areagotzen da. Gainera, monolaborantzek klima-aldakortasunaren aurrean duten erresilientzia txikiagoa agerian uzten du landare-dibertsitatearen garrantzia.

Ikerketa honen berritasunen artean, ur-kalitatearen eta landareen parametro fisiologikoen ebaluazioa izan da, FS-en errendimenduan espezieen arteko elkarrekintzek izan dezaketen eragina detektatzea ahalbidetuz. Horrek FS horien funtzionamendua interpretatzeko ikuspegi integratuagoa eskaintzen du. Halaber, aipatzekoa da esperimentu honetan *Typha*, *Carex* eta *Ceratophyllum* espezieak batera erabilia lehen aldiz aztertu direla.

Etorkizuneko ikerketetan, substratu eta errizosferako mikrobio-dibertsitatea eta jarduera aztertzea komenigarria litzateke. Horrela, mantenugaien ezabapenean gertatzen diren prozesu biokimikoak hobeto ulertu, eta landare-espezieen hautaketa optimizatu ahal izango da, mikrobio-komunitate anitzagoak sustatzen dituztenak lehenetsiz.

7. GrAL GARAPEN JASANGARRIRAKO HELBURUEKIN (GJH) DUEN LOTURA

Gradu Amaierako Lan honetan proposatutako FS-ren diseinuak eta optimizazioak jasangarritasunaren balio demokratikoen barruan kokatzen da, eta bat egiten du hirietako garapen jasangarriko Europako estrategiekin (*Urban Sustainability in Europe*, 2021). Printzipio eta balio demokratikoen arabera, klima-erresilientzia eta ingurumen-osasuna ikuspegi parte-hartzaile baten bidez landu behar dira, erabakiak hartzeko prozesuan herritarren eta sektore desberdinen lankidetzak ahalbidetuta. Ildo horretan, uraren arazketarako FS-ren aplikazioak eredu egingarri eta erreplikagarri bat eskaintzen du, landa-eremuetan baita hiri-komunitateetan ere onuragarria izan daitekeena. Gainera, lan honek zenbait Garapen Jasangarrirako Helburu (GJH) betetzea sustatzen du. Lehenik, fitoarazketa, teknologia deszentralizatua eta kostu txikikoa izanik, azpiegitura mugatuak dituzten eskualdeetarako alternatiba bideragarri bat izan daiteke. Gainera, produktu kimikoen isurketa murrizten duenez, uraren kalitatea eta osasun-arriskuak gutxitzen laguntzen du, **6.**

GJH "Ur garbia eta saneamendua" printzipioarekin bat eginez. Era berean, **13. GJH, "Klimaren aldeko ekintza"** betetzea laguntzen du, ingurumen-jasangarritasuna

indartzen duelako. FS-ek, hondakin-urak tratatzeko metodo konbentzionalekiko mendekotasuna murrizten dute eta prozesu naturalen bidez ur-ekosistemen kalteak saihesten dituzte. Azkenik, **14. GJH, "Itsaspeko bizitza"** betetzea FS-ek eutrofizazioa murrizteko duten gaitasunean oinarritzen da. N eta P bezalako mantenugaiak ezabatzean, algak kontrolik gabe haztea saihesten da. Hala, ur-biodibertsitatearen eta ekosistemen osasuna mantentzen laguntzen dute.

8. ESKER ONAK

Eskerrak eman nahi dizkiot Eusko Jaurlaritzari "Ikasiker" lankidetzak-bekagatik, eta BBUP-ari, Buiako araztegiaren hondakin-urak biltzen laguntzeagatik. Halaber, Endika Lecaroz ikasleari FS-ren mantentze-lanetan laguntzeagatik. EHUKo Zerbitzu Orokorren (SGIker) Fitotroi eta Berotegi zerbitzuari ere eskertu nahi diot, esperimentuan zehar eskainitako baliabideengatik. Azkenik, lan hau BEZ-EKOFISKO ikerketa-taldearen finantziarioari esker posiblea izan da.

9. BIBLIOGRAFIA

- Abdelhakeem, S. G., Aboulroos, S. A., & Kamel, M. M. (2016). Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *Journal of Advanced Research*, 7(5), 803–814. doi: 10.1016/j.jare.2015.12.002.
- Agaton, C. B., & Guila, P. M. (2023). Ecosystem Services Valuation of Constructed Wetland as a Nature-Based Solution to Wastewater Treatment. *Earth*, 4(1), 78-92. doi: 10.3390/earth4010006.
- Almuktar, S. A., Abed, N. S., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23595–23623. doi: 10.1007/s11356-018-2629-3.
- Bharagava, R. N., & Saxena, G. (2020). Introduction to Industrial Wastes Containing Organic and Inorganic Pollutants and Bioremediation Approaches (Eds.), *Bioremediation of industrial waste: Volume II: Biological agents and methods* (pp. 1-15) Springer.
- Białowiec, A., Sobieraj, K., Pilarski, G., & Manczarski, P. (2019). The oxygen transfer capacity of submerged plant *Elodea Densa* in wastewater constructed wetlands. *Water*, 11(3), 575. doi: 10.3390/w11030575.
- Bouamra, F., Drouiche, N., Abdi, N., Grib H., Mameri N., & Lounici H. (2018). Removal of Phosphate from Wastewater by Adsorption on Marble Waste: Effect of Process Parameters and Kinetic Modeling. *International Journal of Environmental Research*, 12, 13–27. doi: 10.1007/s41742-018-0065-3.
- Consejo de la Unión Europea. (1991). Directiva 91/271/CEE del 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 135, 40-52.

- Dehghani T. A., Houweling, D., & Perron, J. M. (2024). Towards a modelling framework for nature-based solutions in wastewater treatment. IWA Publishing.
- Encinas-Valero, M., Esteban, R., Here, A. M., Becerril, J. M., García-Plazaola, J. I., Artetxe, U., ... Curiel Yuste, J. (2022). Photoprotective compounds as early markers to predict holm oak crown defoliation in declining Mediterranean savannahs. *Tree Physiology*, 42 (2), 208-224. doi: 10.1093/treephys/tpab006
- European Environment Agency (EEA) (2021). *Urban sustainability in Europe: Learning from nexus analysis* (EEA Report No. 07/2021). Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu>, 2025eko martxoan kontsultatua.
- Fernández, J., de Miguel, E., de Miguel, J., & Curt, M. D. (2004). *Manual de fitodepuración: Filtros de macrofitas en flotación* (pp. 1–146). Madrid: Fundación Global Nature.
- García-Herrero, L., Lavrni, S., Guerrieri, V., Toscano, A., Milani, M., Cirelli, G. L., & Vittuari, M. (2022). Cost-benefit of green infrastructures for water management: A sustainability assessment of full-scale constructed wetlands in Northern and Southern Italy. *Ecological Engineering*, 185(106797), 106797. doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106797
- Gupta, S., Srivastava, P., & Yadav, A. (2019). Simultaneous removal of organic matters and nutrients from wastewater in constructed wetlands followed by entrapped algal systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1112-1117. doi: 10.1007/s11356-019-06896-z.
- Hald-Mortensen, C. (2024). The Climate-Biodiversity Nexus Reviewed: Navigating Tipping Points, Science-Based Targets & Nature-Based Solutions. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 3(6), 01-11.
- Hao, Q., Lyu, X., Qin, D., Du, N., Wu, S., Bai, S., ... Zhao, X. (2024). Synergistic mechanisms of denitrification in FeS₂-based constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 406(131066), 131066. doi: 10.1016/j.biortech.2024.131066
- Jiang, S., Xu, J., Wang, H., & Wang, X. (2022). Study of the effect of pyrite and alkali-modified rice husk substrates on enhancing nitrogen and phosphorus removals. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(36), 54234–54249. doi: 10.1007/s11356-022-19537-9
- Kumar, S., & Dutta, V. (2019). Constructed wetland microcosms as sustainable technology for domestic wastewater treatment: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11662-11673. doi: 10.1007/s11356-019-04816-9.
- Lacalle, R. G., Aparicio, J. D., Artetxe, U., Urionabarrenetxea, E., Polti, M. A., Soto, M., ... Becerril, J. M. (2020). Gentle remediation options for soil with mixed chromium (VI) and lindane pollution: biostimulation, bioaugmentation, phytoremediation and vermiremediation. *Heliyon*, 6(8). doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04550.
- Lotfi, K., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Mjalli, F., Zeynoddin, M., Delatolla, R., & Gharabaghi, B. (2019). Predicting wastewater treatment plant quality parameters using a novel hybrid linear-nonlinear methodology. *Journal of environmental management*, 240, 463-474. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.137.

- Mahdi Al-Nabhan, E. A., & Al-Abbawy, D. A. H. (2021). Improving Wastewater Quality By Using *Ceratophyllum demersum* L. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 910(1), 012086. doi: 10.1088/1755-1315/910/1/012086.
- Maucieri, C., Salvato, M., & Borin, M. (2020). Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 152(105853), 105853. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105853.
- Moretti, A., Ivan, H., & Skvaril, J. (2024). A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. *Journal of Water Process Engineering*. 60(105061). doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105061.
- Salcedo, A. J. M., Cañedo-Argüelles, M., Kaushal, S. S., Ciriero-Cebrián, E. M., Pérez-Blanco, A., & Salvadó, H. (2022). Assessing the effects of salinity on microbial communities and pollutant removal in urban wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, 814, 152747. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152747.
- Mozaffari, M., Shafiepour, E., Mirbagheri, S., Rakhshandehroo, G., Wallace, S., & Stefanakis, A. (2021). Hydraulic characterization and removal of metals and nutrients in an aerated horizontal subsurface flow "racetrack" wetland treating primary-treated oil industry effluent. *Water research*, 200, 117220. doi: 10.1016/j.watres.2021.117220.
- Osaka, S., Bellamy, R., & Castree, N. (2021). Framing "naturebased" solutions to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12. doi: 10.1002/wcc.729.
- Rana, V., & Maiti, S. K. (2020). Municipal and industrial wastewater treatment using constructed wetlands. In *Concepts and Strategies in Plant Sciences* (pp. 329–367). Springer International Publishing.
- Saeed, T., Yadav, A. K., & Miah, M. J. (2022). Landfill leachate and municipal wastewater co-treatment in microbial fuel cell integrated unsaturated and partially saturated tidal flow constructed wetlands. *Journal of Water Process Eng.* 46, 102633. doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102633.
- Shelef, O., Golan-Goldhirsh, A., Gendler, T., & Rachmilevitch, S. (2011). Physiological parameters of plants as indicators of water quality in a constructed wetland. *Environmental Science and Pollution Research International*, 18(7), 1234–1242. doi: 10.1007/s11356-011-0473-9.
- Su, F., Li, Z., Li, Y., Xu, L., Li, Y., Li, S., ... Wang, F. (2019). Removal of total nitrogen and phosphorus using single or combinations of aquatic plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4663. doi: 10.3390/ijerph16234663.
- UN Habitat & WHO. (2021). *Progress on wastewater treatment: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) and World Health Organization (WHO). ISBN 978-92-1-132878-3.
- Zhu, H., Zhou, Q., Yan, B., Liang, Y., Yu, X., Gerchman, Y., & Cheng, X. (2018). Influence of vegetation type and temperature on the performance of constructed wetlands for nutrient removal. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 77(3–4), 829–837. doi: 10.2166/wst.2017.556.

10. ERANSKINAK

1E. taula. Fraisoro Laborategiko hondakin-uren analisi fisiko-kimikorako erabilitako prozedurak. Parentesi artean parametroen detekzio-mugak adierazten dira. Akreditazioa Z^a 434LE/1057 (ENAC).

PARAMETROA	PROZEDURA
pH (1,7 - 12 pH unitate)	PNTE/LF/303 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: SM 4500-H+ B
Konduktibitatea (10 - 50000 µS/cm)	PNTE/LF/301 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: UNE-EN 27888
Solido esekiak (≥ 10 mg/L)	PNTE/LF/304 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: UNE-EN 872
Amonioa (titulazio bolumetrikoaren bitartez) (≥ 10 mg/L)	PNTE/LF/315 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: SM 4500-NH3 B y C
Amonioa (espektrofotometria UV-VIS bitartez) (≥ 0,05 mg/L)	PNTE/LF/314 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: SM 4500-NH3 F
Anioiak (kromatografia ioniko bidez) Kloruroak (≥ 5 mg/L) Fluoruroak (≥ 0,25 mg/L) Nitratoak (≥ 0,5 mg/L) Nitritoak (≥ 0,05 mg/L) Sulfatoak (≥ 5 mg/L)	PNTE/LF/308 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: SM 4110 B
Fosforoa/Ortofosfatoak (ICP/MS bidez) * Ortofosfatoan adierazten da ingurune azidoan disolbatutako fosforo guztia	PNTE/LF/305 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: SM 3125 B
Oxigeno-Eskari Kimikoa (OEK) (espektrofotometria UV-VIS bitartez) (≥ 15 mg O ₂ /l)	PNTE/LF/309 Barne-metodoa hurrengoan oinarrituta: UNE 77004
Oxigeno-Eskari Biologikoa (OEB ₅) (errespirometria)	SM 5210 D

2E. formula: Nitrogeno eta fosforoaren murrizpen erlatiboak (%) kalkulatzeko erabilitako formulak.

1. fasea (T0-T14):

$$\text{Murrizpen erlatiboa (\%)} = \frac{[T0] - [T14]}{[T0]} \times 100$$

$$\text{Esperotako kontzentrazioa (mg/L)} = \frac{[T14]V_{\text{sistema}} + [\text{kargarako erabilitako efluenta}]V_{\text{karga}}}{V_{\text{totala}}} \times 100$$

non: $V_{\text{sistema}} = 6,5 \text{ L}$, $V_{\text{karga}} = 0,5 \text{ L}$, $V_{\text{totala}} = 7 \text{ L}$

2. fasea (T14-T28):

$$\text{Murrizpen erlatiboa (\%)} = \frac{[\text{Esperotakoa}] - [T28]}{[\text{Esperotakoa}]} \times 100$$

3E. taula. Fitoarazte-sisteman erabilitako hondakin-uren karakterizazioa (T0), Fraisoro laborategian egindakoa. Emaitzen batezbestekoa eta errore estandarra adierazten da (n=3).

PARAMETROA	EMAITZA
pH	$6,9 \pm 0,0$
Konduktibitatea ($\mu\text{S/cm}$)	$668,7 \pm 3,7$
Solido esekiak (mg/L)	$11,4 \pm 1,6$
Amonioa (mg/L)	$2,1 \pm 0,2$
Nitrogeno inorganiko totala (mg/L)	$20,9 \pm 0,02$
Anioiak (mg/L)	
Kloruroak	$42,2 \pm 0,1$
Fluoruroak	$0,2 \pm 0,0$
Nitratoak	$81,9 \pm 0,5$
Nitritoak	$1,46 \pm 0,1$
Sulfatoak	$58,3 \pm 0,1$
Fosforoa/Ortofosfatoak (mg/L)	$9,43 \pm 0,4$
Oxigeno-Eskari Kimikoa (OEK) (mg/L)	$31,67 \pm 1,9$
Oxigeno-Eskari Biologikoa (OEB ₅) (mg/L)	$8,67 \pm 0,3$

4E. taula. 14 eta 28 egunetan tratamendu bakoitzeko efluentean zehaztutako nitrogeno totalaren kontzentrazioak (mg/l). Balioek batez bestekoa $\pm$ errore estandarra adierazten dute.

TRATAMENDUA	T14 (mg N/L)	T28 (mg N/L)
T	0'17 $\pm$ 0'17	0'13 $\pm$ 0'13
Cx	0,00 $\pm$ 0,00	0'23 $\pm$ 0'23
Ct	0'43 $\pm$ 0'19	0'23 $\pm$ 0'23
T + Ct	0'00 $\pm$ 0'00	0'43 $\pm$ 0'34
Cx + Ct	0'03 $\pm$ 0'03	0'80 $\pm$ 0'53
T + Cx + Ct	0'07 $\pm$ 0'07	0'13 $\pm$ 0'13
K	6'57 $\pm$ 0'48	0'00 $\pm$ 0'00

5E. taula. 14 eta 28 egunetan tratamendu bakoitzeko efluentean zehaztutako fosforo totalaren kontzentrazioak (mg/l). Balioek batez bestekoa $\pm$ errore estandarra adierazten dute.

TRATAMENDUA	T14 (mg P/L)	T28 (mg P/L)
T	0,4 $\pm$ 0,4	0,5 $\pm$ 0,2
Cx	0,00 $\pm$ 0,00	0,3 $\pm$ 0,3
Ct	0,00 $\pm$ 0,00	0,4 $\pm$ 0,2
T + Ct	0'00 $\pm$ 0'00	0,3 $\pm$ 0,2
Cx + Ct	0'00 $\pm$ 0'00	0,1 $\pm$ 0,0
T + Cx + Ct	0'00 $\pm$ 0'00	0,1 $\pm$ 0,1
K	0'00 $\pm$ 0'00	0'00 $\pm$ 0'00