

**CONVENI ENTRE LA GENERALITAT A TRAVÉS DE LA
CONSELLERIA D'AGRICULTURA,
DESENVOLUPAMENT RURAL, EMERGÈNCIA CLIMÀTICA I
TRANSICIÓ ECOLÒGICA I LA
UNIVERSITAT MIGUEL HERNÁNDEZ D'ELX PER A L'EXECUCIÓ EN
L'EXERCICI 2021 DE PROJECTES
D'INVESTIGACIÓ APLICADA A RECURSOS HÍDRICS EN LA
COMUNITAT VALENCIANA**

INFORME



Control de la càrrega contaminant de les aigües d'ús agrícola mitjançant tecnologies verdes

1. Justificació i objectius del projecte.

L'objecte del conveni del qual deriven els resultats d'aquest projecte d'investigació és el de la utilització de tecnologies ambientals verds per a afavorir el control de la càrrega contaminant d'aigües d'ús agrícola.

Aquest projecte, continua amb les línies de treball impulsades pel Govern Valencià, a través de la Direcció General d'Aigües de la Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica. Les activitats desenvolupades serveixen per a valorar les possibilitats que té l'ús de materials residuals en la depuració d'aigües i el projecte s'emmarca dins de les estratègies de la Unió Europea quant a l'economia circular, residus zero i el pacte verd europeu (*European Green Deal*).

La finalitat de les accions realitzades ha sigut la de determinar les possibilitats de reducció d'elements contaminants que acompanyen les aigües de reg i drenatges agrícoles, que poden ocasionar efectes negatius tant en aigües superficials, com en aigües subterrànies i en les costes.

Per a això, s'han utilitzat com a orientació d'aquest treball el Reial decret 817/2015, d'11 de setembre, pel qual s'estableixen els criteris de seguiment i avaluació de l'estat de les aigües superficials i les normes de qualitat ambiental, entre altres, així com el Reial decret 876/2014, de 10 d'octubre, pel qual s'aprova el Reglament general de costes, a més de la consulta a la bibliografia científica existent sobre aquest tema.

2. Equip investigador.

Equip d'investigació constituït pel personal docent i investigador del Departament d'Agroquímica i Medi Ambient:

Àrea de coneixement d'Edafologia i Química Agrícola:

Jose Navarro Pedreño (coordinador del projecte)

Manuel Miguel Jordán Vidal

Ignacio Gómez Lucas

Àrea de coneixement d'Enginyeria Química:

María Belén Almendro Candel

Ignacio Meléndez Pastor

A aquest grup d'investigadors, se li han unit dues persones contractades per a suport tècnic i científic en la realització del projecte:

María Teresa Rodríguez Espinosa

Verónica Esperanza Muñoz Chacón

L'equip d'investigació d'aquesta manera, va quedar constituït per set persones i amb els contractes de suport, s'ha fomentat la paritat entesa com una participació equilibrada d'homes i dones en el desenvolupament d'aquest projecte.

Aquest estudi ha comptat amb el suport administratiu, entre altres persones, de Eva Isabel España Núñez i María Virtudes García Hernández en el Departament d'Agroquímica i Medi Ambient.

3. Disseny experimental i metodologia.

L'estudi es va desenvolupar en dues fases:

- La primera va consistir en el disseny dels experiments pilot per a l'estudiar els efectes dels tractaments basats en solucions de la naturalesa i l'ús de bioreactors, sobre la millora de la qualitat de les aigües.
- La segona va consistir en la posada en marxa, funcionament, seguiment i control de les estructures experimentals per a determinar la qualitat de les aigües i l'efectivitat d'aquestes instal·lacions per a la seua possible implementació a escala real.

3.1. Fase 1.

En la primera fase es van dissenyar dos prototips de filtres verds passius anaerobis a escala de laboratori. Es van utilitzar dos tipus de materials. Un de caràcter inorgànic procedent de les activitats extractives d'àrids calcaris (llast). L'altre, d'origen agrícola constituït per residus orgànics procedents de podes, sent en aquest cas corresponents a podes d'ametlers. Les restes de poda d'ametler es van triturar i van esmicolar amb una grandària inferior als 50 mm. El llast utilitzat va ser la fracció de grandària de gra de 2-3 mm, consistent en la seua pràctica totalitat en carbonat de calci i en menor mesura de magnesi.

Tots dos residus es mostren en la següent figura.



Figura 1. Materials utilitzats per als bioreactors.

Aquests materials es van combinar per a veure l'eficàcia de tots dos i les seues possibles sinergies en els **següents tractaments** previstos en el conveni:

- Llit filtrant anaerobi lineal contenint llast (LZ)
- Llit filtrant anaerobi lineal contenint llast + restes de poda (LA)

Després de les primeres observacions, addicionalment es va posar en marxa un conjunt de nous dissenys experimentals, tractaments en els quals es va prevaldre la profunditat enfront de la linealitat del tractament anterior, donant lloc a:

- Llit filtrant anaerobi en profunditat contenint llast (VZ)
- Llit filtrant anaerobi en profunditat contenint llast + restes de poda (VA)

En aquests quatre tractaments pilot, es va crear un mitjà anaerobi amb la finalitat d'estudiar els efectes sobre els nutrients que porten les aigües de reg emprades per la comunitat de regants de la Séquia Major del Pantà d'Elx. Es van configurar com a bioreactors passius en els quals es desenvolupa una activitat biològica intrínseca, la finalitat inicial de la qual és la de consumir nutrients com a N i P. Així, s'espera que, després del pas pel bioreactor, el seu contingut en aigües disminuïska.

El disseny de tots dos, tant el reactor lineal com vertical, es presenta en la figura 2. Tots dos van comptar amb el subministrament de la mateixa mena d'aigua a l'entrada, utilitzant bombes peristàltiques que van garantir el mateix cabal d'entrada en tots els experiments, situat amb valors mitjans entre 2,1 i 2,3 l/dia. Al llarg de tota l'experimentació, es van controlar setmanalment els fluxos d'entrada d'aigua i les eixides. El flux mitjà d'eixida, després de les huit primeres setmanes de funcionament considerades d'estabilització, va mostrar una certa variabilitat de 2,3 i 2,6 l/dia, especialment a causa de les possibles pèrdues per evaporació en els mesos més calorosos de l'estiu, pèrdues que té tot sistema obert.



Figura 2. Detall del sistema experimental lineal i del vertical empleats en l'estudi.

El reactor lineal tenia una longitud de llit filtrant d'un metre, amb una altura d'aigua de quinze centímetres determinada pel sífó situat al final del recipient. El reactor vertical, l'altura de l'aigua aconseguida, estava limitada pel sífó a quaranta-cinc centímetres. En el cas dels tractaments amb restes de poda d'ametla, el filtre comptava amb deu centímetres de residu orgànic i la resta corresponia a residu inorgànic, a llast.

El **temps mitjà de retenció de l'aigua** en cadascun dels tractaments no va anar exactament el mateix, però va tindre valors molt pròxims. En el cas dels bioreactors lineals el temps mitjà va

ser de $4,2 \pm 0,3$ i $4,1 \pm 0,5$ dies per a LZ i LA respectivament, mentre que, en els verticals, es va estimar en $3,7 \pm 0,8$ i $4,0 \pm 1,0$ dies per a VZ i VA. La major variabilitat es va detectar en els dos tractaments en els quals es va emprar restes de poda.

Els bioreactors es van cobrir amb una malla de 1mm, per a reduir la pèrdua per evaporació i evitar l'accés accidental d'insectes i llavors.

3.2. Fase 2.

Una vegada determinats i fixats les dades de disseny, l'estudi es va centrar en el control dels següents paràmetres:

- Evaporació.
- pH.
- Conductivitat elèctrica (salinitat).
- TSS, sòlids en suspensió.
- DQO.
- Nitrogen total (Nt).
- Fòsfor total (Pt).

Els paràmetres de les aigües van ser analitzats seguint la metodologia estàndard (basada en *Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association*).

Es va realitzar un seguiment setmanal, sent el temps mínim estipulat en el conveni de seguiment de la qualitat de dos mesos (8 setmanes), per a poder aconseguir els objectius proposats.

El temps de seguiment finalment en tots dos dissenys experimentals, lineal i vertical, es va estendre més a allà del que es preveu en el conveni, donada la importància que té conèixer el funcionament d'aquests bioreactors. A dates d'elaboració d'aquest informe, els dos tractaments lineals van abastar una duració de 21 setmanes mentre que els verticals van estar funcionant 13 setmanes. A data de lliurament d'aquest informe, se segueix amb el funcionament dels bioreactors per a conèixer el seu funcionament i saber a més llarg termini la seua eficàcia

4. Resultats.

Els resultats obtinguts, es mostren a continuació de manera breu per a cada paràmetre analitzat. En les taules de resultats, a manera de resum, els valors mitjans i la variabilitat dels mateixos mitjançant la desviació estàndard (SD), el valor màxim i el mínim detectats durant tot el període de temps.

4.1. Evaporació.

Amb la finalitat d'estimar les possibles pèrdues per evaporació, es va disposar d'un sistema amb provetes d'1 litre i amb làmines d'aigua lliure i làmina d'aigua coberta amb malla negra d'1 mm emprada per a cobrir els bioreactors. Aquest sistema paral·lel als bioreactors es va disposar en les mateixes condicions ambientals de temperatura i humitat.

Els resultats mostren que l'ús de la malla redueix notablement les pèrdues per evaporació durant tot el període estudiat, amb una reducció mitjana de les pèrdues del 30%. No obstant això, en el període estival aquestes reduccions de la pèrdua per evaporació es van situar entorn del 50%, quan les temperatures són més altes al juliol i agost.

Taula 1. Evaporació d'aigua estimada usant làmina d'aigua lliure amb malla i sense l'ús d'aquesta, dades mitjanes de temperatura i humitat relativa durant el temps d'experimentació.

Evaporació (mm/setmana)	Mitjana	SD	Màxim	Mínim
Amb malla	0,5	0,2	0,7	0,1
Sense malla	0,7	0,2	1,1	0,4
Temperatura °C	29,6	5,5	45,9	17,1
Humitat relativa (%)	54,7	15,5	89,9	8,7

4.2. pH.

Les variacions en el pH són escasses, els valors mitjans que hem obtingut indiquen que es produeix una lleugera diferència entre els tractaments en els quals solament tenim residus calcaris i aquells combinats amb les restes de poda, disminuint el valor mitjà del pH de manera més notòria.

Taula 2. Valors del pH de les aigües a l'entrada i eixida dels tractaments.

pH (uds de pH)	Entrada	SD	Màxim	Mínim	Eixida	SD	Màxim	Mínim
LZ	8,3	0,1	8,5	8,1	8,2	0,0	8,2	8,1
LA	8,3	0,1	8,5	8,1	7,9	0,7	8,5	5,1
VZ	8,2	0,1	8,3	8,1	8,1	0,1	8,3	8,0
VA	8,2	0,1	8,3	8,1	7,8	0,2	8,1	7,6

4.3. Conductivitat elèctrica (CE).

La conductivitat elèctrica, amb valors referenciats a 25 °C, està directament associada a la salinitat de les aigües d'entrada, que és elevada. En aquest cas, atesos els valors mitjans obtinguts, les aigües no milloren en aquest aspecte, mantenint valors similars o lleugerament superiors als de les aigües d'entrada als bioreactors.

En aquest sentit, almenys en aquests experiments realitzats i en el temps de duració que es descriu en aquest informe, la salinitat de les aigües no millora amb els tractaments.

Taula 3. Valors del CE de les aigües a l'entrada i eixida dels tractaments.

CE ₂₅ (ms/cm)	Entrada	SD	Màxim	Mínim	Eixida	SD	Màxim	Mínim
LZ	17,5	1,5	18,8	11,2	19,2	1,7	21,0	13,6
LA	17,5	1,5	18,8	11,2	19,0	1,3	20,8	15,7
VZ	17,8	0,6	18,8	16,7	18,2	0,8	20,2	17,0
VA	17,8	0,6	18,8	16,7	18,1	0,8	19,7	16,9

4.4. Sòlids en suspensió (TSS).

En el cas dels TSS, podem apreciar un comportament diferent segons tinguem solament material inorgànic o considerem els tractaments combinats (inorgànic + orgànic). En els primers (LZ i VZ), s'aprecia una reducció dels TSS, mentre que en els segons (LA i VA), aquest paràmetre s'incrementa a causa de les aportacions de les restes orgàniques, tal com s'aprecia en la figura 3. No obstant això, aquestes aportacions van disminuir notablement amb el pas de les setmanes.

Taula 4. Valors de TSS de les aigües a l'entrada i eixida dels tractaments.

TSS (mg/l)	Entrada	SD	Màxim	Mínim	Eixida	SD	Màxim	Mínim
LZ	41	9	60	24	32	9	68	18
LA	41	9	60	24	170	138	626	39
VZ	44	8	60	34	26	2	29	21
VA	44	8	60	34	83	68	217	25

4.5. Demanda química d'oxigen (DQO).

Els valors de DQO obtinguts inicialment per a les aigües d'eixida dels tractaments que disposaven de restes orgàniques de poda van ser extraordinàriament elevats, disminuint amb el temps, tal com es pot apreciar per la coloració de les aigües tractades obtingudes en els tractaments amb restes de poda d'ametler que s'aprecien en la figura 3.

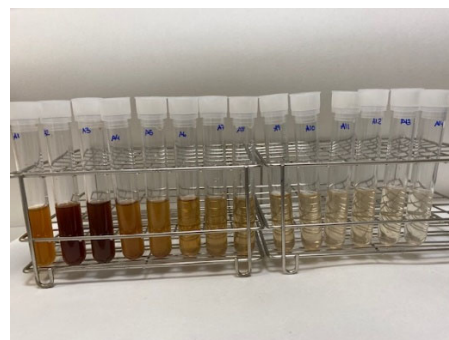
Amb el temps, les aigües tractades no van presentar coloració en tots els tractaments, però mantenint-se superiors els valors de DQO en aquelles en el tractament de les quals participava les restes de poda (LA i VA). Aquest fet és molt significatiu, ens està indicant que bé per la transformació del material o l'acció dels microorganismes, o ambdues, s'està produint un increment de matèria orgànica en les aigües. No obstant això, aquest increment també s'aprecia en els tractaments LZ i VZ, la qual cosa ens indica que en bona part, la matèria orgànica associada a la determinació de la DQO, pot tindre origen en la biomassa que s'ha creat en els reactors.

Taula 5. Valors de DQO de les aigües a l'entrada i eixida dels tractaments.

DQO (mg/l)	Entrada	SD	Màxim	Mínim	Eixida	SD	Màxim	Mínim
LZ	98	62	358	38	387	49	488	299
LA	98	62	358	38	1837	3296	14825	432
VZ	112	71	358	69	342	50	412	227
VA	112	71	358	69	586	385	1410	267



Fotografia a



Fotografia b



Fotografia c

Figura 3. Comparació del color de les aigües tractades amb mig inorgànic i amb restes de poda (fotografia a). La fotografia b mostra la reducció del color en les aigües del tractament LA després de 14 setmanes mentre que la fotografia c mostra aquesta reducció del color en el tractament VA transcorregudes 7 setmanes.

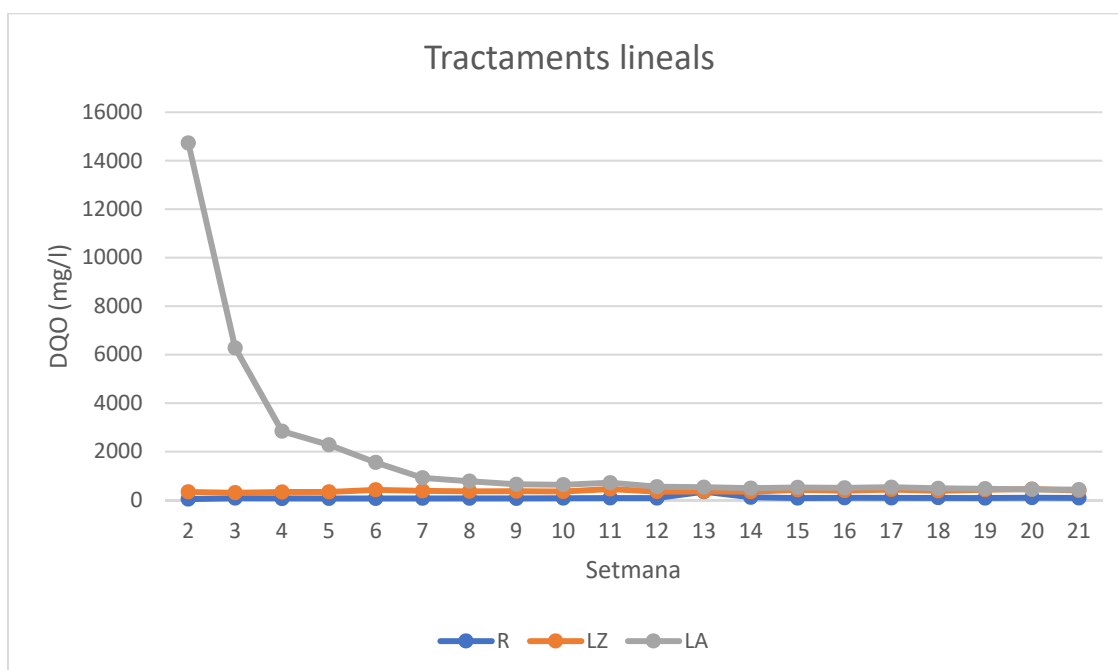


Figura 4. Evolució del valor de DQO en els tractaments lineals.

4.6. Nitrogen total.

El nitrogen total de les aigües serveix per a indicar-nos el contingut d'aquest element, que vaig poder presentar-se en forma de diferents espècies químiques en les aigües, tant en formes orgàniques (formant part de la matèria orgànica) com en inorgàniques, fonamentalment com a nitrats, nitrits i amoni (aquest últim molt dependent del pH).

Quant als resultats, expressats en mil·ligrams de nitrogen per litre d'aigua, s'aprecia com es produeix una disminució en tots els tractaments, considerant els valors mitjans calculats a partir de les dades obtingudes al llarg del temps d'experimentació (el corresponent a l'elaboració d'aquest informe).

De tots els tractaments, destaquen les reduccions obtingudes en el tractament LZ i de manera rellevant en el VA. Aquest fet indica que s'obté una certa efectivitat en la reducció del Nt de les aigües.

Taula 6. Valors de nitrogen total Nt de les aigües a l'entrada i eixida dels tractaments.

Nt (mg/l)	Entrada	SD	Màxim	Mínim	Eixida	SD	Màxim	Mínim
LZ	14,8	6,7	40,0	3,0	11,7	8,5	38,0	0,0
LA	14,8	6,7	40,0	3,0	12,0	7,8	29,0	0,0
VZ	15,5	6,7	40,0	6,0	14,7	6,3	27,0	2,0
VA	15,5	6,7	40,0	6,0	7,8	5,1	15,0	0,0

4.7. Fòsfor total.

El fòsfor s'ha mostrat com el nutrient que s'ha vist afectat en major mesura. Les reduccions aconseguides en tots els tractaments, transcorregudes les setmanes d'experimentació, mostren que es produeix una reducció molt considerable, arribant a valors per davall dels 0,01 mg/l en les aigües tractades.

Aquests descensos mostren una certa irregularitat en el tractament amb presència de restes de poda, mentre que l'eliminació d'aquest nutrient és total en els tractaments LZ i VZ.

Un dels majors riscos d'eutrofització de les aigües s'associa a la presència de fòsfor. Concretament, aquest risc pot ser major per damunt d'1 mg/l de ortofosfat en les aigües. En aquest sentit, en cap cas es van arribar a valors tan alts, exceptuant el tractament LA en les seues primeres setmanes.

En línies generals, es pot indicar com a resultat destacat que, amb aquests sistemes, almenys en el seu desenvolupament com a experiències pilot, s'aconsegueix reduir quasi íntegrament la presència de fòsfor en les aigües.

Taula 7. Valors de fòsfor total Pt de les aigües a l'entrada i eixida dels tractaments.

Pt (mg/l)	Entrada	SD	Màxim	Mínim	Eixida	SD	Màxim	Mínim
LZ	0,1	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
LA	0,1	0,1	0,5	0,0	0,4	1,0	5,2	0,0
VZ	0,1	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
VA	0,1	0,1	0,4	0,0	0,1	0,2	0,7	0,0

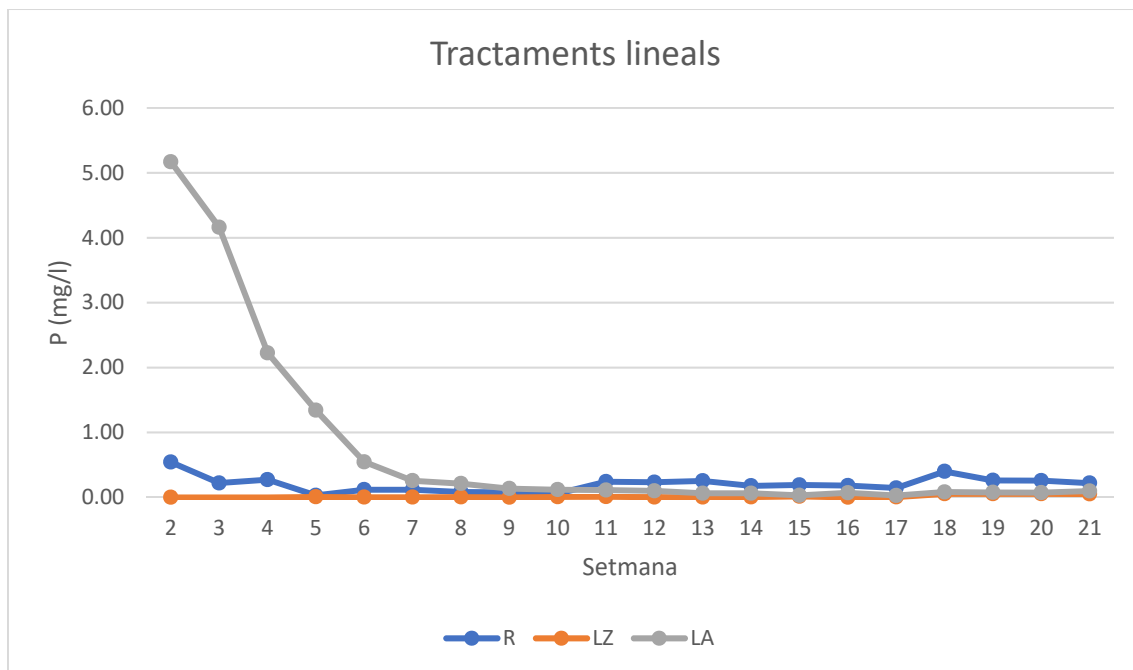


Figura 4. Evolució del Pt en els tractaments lineals.

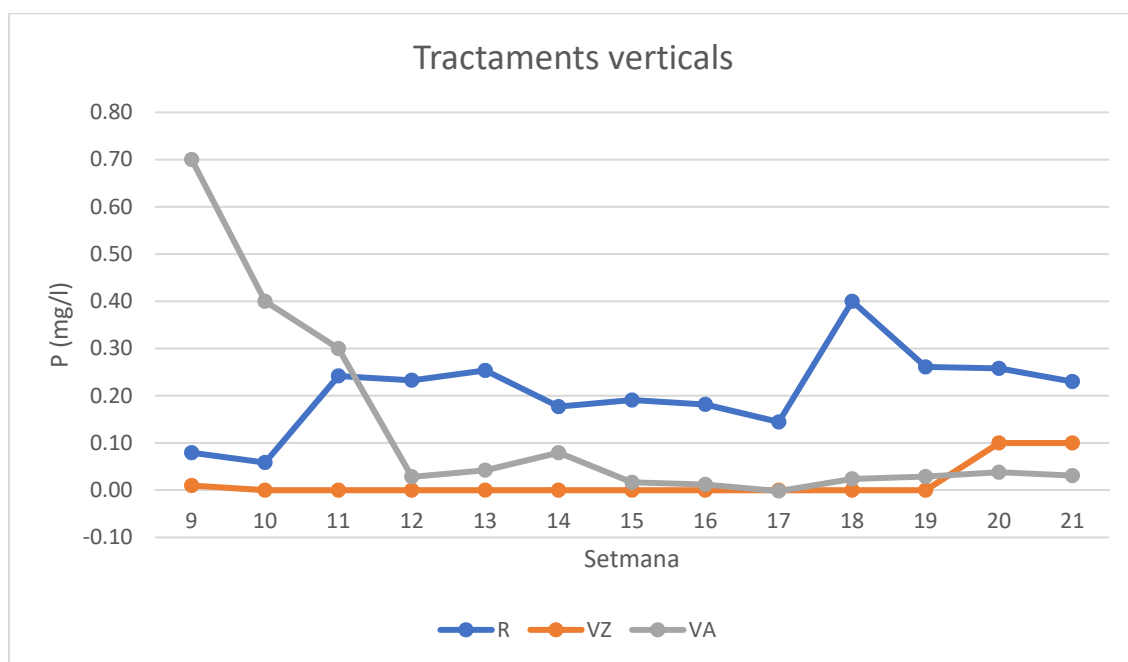


Figura 5. Evolució del Pt en els tractaments verticals.

5. Conclusions.

Entre les conclusions, destaca el paper determinant d'aquests sistemes experimentals en la reducció del contingut en fòsfor en les aigües, tant amb l'ús d'un mitjà inicialment inorgànic (ús de llast) com el mitjà combinat (llast + restes de poda). El fòsfor pot haver sigut el nutrient limitant en el funcionament del bioreactor, tenint en compte que en el cas del nitrogen total no hi ha hagut reduccions tan notables del seu contingut, encara que també s'ha notat un efecte positiu, descendant la seua presència en les aigües.

D'altra banda, els efectes negatius benvolguts es manifesten en l'increment dels sòlids en suspensió TSS i de la demanda química d'oxigen DQO, la qual cosa ens indica la necessitat de complementar aquests dissenys experimentals amb algun altre tractament addicional que disminuïska tots dos paràmetres.

Probablement és necessari abundar en aquesta línia d'experimentació, i concretament en la determinació específica de les espècies nitrogenades i fosfatades, concretament nitrat i ortofosfat, per a veure en quina mesura es veuen afectades per aquesta mena de tractaments.

Es constata que l'ús de restes de poda, almenys els empleats en aquest cas que han sigut restes de poda secs procedents d'ametlers, no han aportat una millora significativa en la qualitat de l'aigua enfront dels tractaments que solament han emprat materials inorgànics, sent a més important l'increment benvolgut en paràmetres de qualitat com DQO i TSS. Possiblement, aquests increments han sigut afavorits per la presència de matèria orgànica en les aigües que amb el pas del temps disminueix, com s'aprecia pel color de les mateixes (figura 3).

No obstant això, convé destacar els resultats quant a la reducció de nutrients com a fòsfor i nitrogen, tant Nt com Pt s'han vist afectats. És el cas del fòsfor el més notable i el que pot arribar a ser un factor limitant per al desenvolupament de la biomassa del reactor, ja que es redueix pràcticament a zero la seua presència en les aigües tractades, la qual cosa converteix aquest resultat en una cosa molt positiva.

Finalment ressenyar que, dels dos sistemes provats, tots dos amb llits anaerobis, el sistema vertical, en el qual es preval la profunditat enfront de la linealitat), sembla oferir millors resultats i és una línia d'actuació que pot portar a bons resultats quant al tractament d'aigües.

6. Referències.

- Álvarez Rogel J, Jiménez Cárceles FJ 2004. Nuevas técnicas en descontaminación y recuperación de aguas residuales: los humedales como filtros verdes. Ed. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- Álvarez-Rogel J, G.G. Barberá, B.Maxwell, M.Guerrero-Brotons, C.Díaz-García, J.J.Martínez-Sánchez, A.Sallent, J.Martínez-Ródenas, M.N.González-Alcaraz, F.J.Jiménez-Cárceles, C.Tercero, R.Gómez 2020. The case of Mar Menor eutrophication: State of the art and description of tested Nature-Based Solutions. *Ecological Engineering* 158(1): 106086.
- Arvydas Povilaitis, Jolanta Matikienė, Rasa Vismontienė 2020. Effects of three types of amendments in woodchip-denitrifying bioreactors for tile drainage water treatment. *Ecological Engineering* 158(1): 106054.
- D. Barrie Johnson, Kevin B. Hallberg 2002. Pitfalls of passive mine water treatment. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 1: 335–343.
- Erin D. Zoski, David R. Lapen, Natalie Gottschall, Raymond S. Murrell, Barclay R. Schuba 2013. Nitrogen, Phosphorus, and Bacteria Removal in Laboratory-Scale Woodchip Bioreactors Amended with Drinking Water Treatment Residuals. *Transactions of the ASABE* 56(4): 1339-1347.
- Jiamin Zhao, Qiaochong He, Nan Chen, Tong Peng, Chuanping Feng 2020. Denitrification behavior in a woodchip-packed bioreactor with gradient filling for nitrate-contaminated water treatment. *Biochemical Engineering Journal* 154: 107454.
- Jiamin Zhao, Chuanping Feng, Shuang Tong, Nan Chen, Shanshan Dong, Tong Peng, Shunlong Jin 2018. Denitrification behavior and microbial community spatial distribution inside woodchip-based solid-phase denitrification (W-SPD) bioreactor for nitrate-contaminated water treatment. *Bioresource Technology* 249: 869-879.
- Lino J. Alvarez-Vázquez, Francisco J. Fernández, Aurea Martínez 2010. Optimal management of a bioreactor for eutrophicated water treatment: a numerical approach. *Journal of Scientific Computing* 43: 67–91.
- Lukáš Dvořák, Marcel Gómez, Jan Dolina, Aleš Černín 2015. Anaerobic membrane bioreactors—a mini review with emphasis on industrial wastewater treatment: applications, limitations and perspectives. *Desalination and Water Treatment* 57(41): 19062-19076.
- N. Cicek 2003. A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater. *Canadian Biosystem Engineering* 45: 37-49.
- Ralph J. Portier, Gary P. Miller 1991. Immobilized microbe bioreactors for waste water treatment. *Waste Management & research*, 9(5): 445-451.
- Visvanathan Chettiyappan, Abeynayaka Amila 2012. Developments and future potentials of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs). *Membrane and Water Treatment* 3(1): 1-23.

7. Difusió.

Aquests treballs de recerca es difondran com correspon a la política de la Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica, i apareixerà el seu patrocini en tota publicació científica i divulgació que es derivarà del present projecte, deixant constància que es tracta d'una actuació subvencionada per la Generalitat Valenciana.

En aquest sentit convé indicar que la Conselleria posa a disposició pública aquests resultats, i que, des de la Universitat Miguel Hernández d'Elx, aquests resultats es difondran com en el cas dels convenis anteriors.

En aquest sentit indicar que, dels treballs previs, s'han publicat recentment en dues revistes internacionals de prestigi, resultats obtinguts gràcies al desenvolupament d'aquestes investigacions fomentades des de la Direcció General de l'Aigua de la Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica.

Aquestes publicacions recents són les següents:

Agricultural drainage water characterization to determine the desalination possibilities for irrigation in a semi-arid environment.

January 2021 **Desalination and Water Treatment** 227:34-41

DOI: 10.5004/dwt.2021.27301

Occurrence of Pesticides Associated with an Agricultural Drainage System in a Mediterranean Environment

November 2021 **Applied Sciences** 11(21), 10212

DOI: 10.3390/app112110212

