

Lo sviluppo sostenibile dell'agricoltura urbana: il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

Angela Iannuzzi¹

¹Affiliation not available

Abstract

Il rapido aumento della popolazione mondiale sta mettendo a dura prova il nostro ambiente, l'uso eccessivo ed improprio delle risorse naturali si è moltiplicato a causa dell'aumento della domanda globale di cibo con conseguente incremento della produzione agricola. All'avanzamento della filiera agroalimentare sono riconducibili problematiche come: l'aumento della domanda di acqua, maggiori emissioni globali, degrado ambientale. Per far fronte a ciò è fondamentale garantire il diritto di accesso al cibo a tutti, garantendo che sia sano, nutriente e sostenibile dal punto di vista ambientale ed implementando una produzione alimentare quanto più naturale possibile in una prospettiva dell'economia circolare. Negli ultimi anni stiamo assistendo alla diffusione dell'Agricoltura urbana; l'acquaponica è una forma di essa e rappresenta l'integrazione simbiotica del sistema di acquacoltura e la coltivazione idroponica in un unico sistema produttivo a riciclo continuo. Il presente lavoro sarà incentrato sullo studio di due sistemi acquaponici: uno convenzionale e uno integrato con trattamenti innovativi (MBR, disinfezione con UV e ozono) con particolare focus sul recupero di nutrienti e sulla valutazione dell'efficacia di trattamenti specifici volti a migliorare la qualità e la produttività di essi.

Il concetto di agricoltura urbana : idroponica e acquacoltura

Il sistema alimentare è uno dei principali motori del cambiamento climatico, dei cambiamenti nell'uso del suolo, dell'esaurimento delle risorse di acqua dolce e dell'inquinamento degli ecosistemi acquatici e terrestri ¹. E' stato stimato che che entro il 2050, a seguito dei cambiamenti attesi nei livelli di popolazione e conseguente aumento della produzione

agricola , gli effetti negativi ambientali del sistema alimentare potrebbero aumentare del 50-90% in assenza di cambiamenti tecnologici e misure di mitigazione dedicate².L'ultimo vertice sui sistemi alimentari tenuto dalle Nazioni Unite (UNFSS) ha mirato ad affrontare le questioni più urgenti che i sistemi alimentari devono sostenere , tra cui la sicurezza alimentare, la qualità della dieta e la sostenibilità ambientale ^{3 45}. Il primo obiettivo del Food Systems Summit ,infatti, è quello di garantire il diritto di accesso a tutti ad un cibo che sia sano, nutriente e sostenibile dal punto di vista ambientale . La semplice produzione di un volume maggiore di cibo non garantirà il benessere umano. Devono essere affrontate anche altre sfide cruciali, come la riduzione della povertà, integrazione sociale, maggiore equità, istruzione e assistenza sanitaria, conservazione della biodiversità, energia sostenibile⁶, sicurezza idrica⁷ , l'adattamento e la mitigazione dei cambiamenti climatici. ⁸. Le tecnologie future e l'innovazione sistemica sono fondamentali per la profonda trasformazione di cui ha bisogno il sistema alimentare. Queste innovazioni spaziano dalla produzione alimentare, all'uso del suolo e alle emissioni⁹¹⁰, fino al miglioramento della gestione dei rifiuti ¹¹. Nel passaggio a un'agricoltura efficiente e sostenibile, sono stati sviluppati vari sistemi agricoli innovativi. L'agricoltura urbana, una pratica di coltivazione, lavorazione e distribuzione di cibo all'interno o intorno all'area urbana, è un'alternativa emergente all'agricoltura rurale convenzionale. Non solo garantisce la fornitura di cibo fresco ai principali consumatori, ma genera anche occupazione, migliora l'efficienza della catena di approvvigionamento, ricicla i rifiuti urbani, crea spazi verdi e rafforza la resilienza delle città ai cambiamenti climatici ¹². Il riciclaggio dei rifiuti nelle fattorie urbane, attraverso riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti ,favorisce ulteriormente la simbiosi urbana, contribuendo a costruire un'economia circolare nelle città ¹³. Negli ultimi anni si stanno sempre più diffondendo pratiche di agricoltura urbana fuori suolo sulle coperture o all'interno di edifici; esempi sono serre su tetto o *vertical farm* che utilizzano sistemi multipiano verticali per la produzione di prodotti agricoli ¹⁴.

Nella logica di agricoltura urbana rientrano la coltivazione idroponica, l'acquacoltura e i sistemi acquaponici. L'idroponica descrive una strategia usata per la coltivazione di piante fuori suolo con l'apporto di acqua ricca di sostanze nutritive piuttosto dell'utilizzo di un terreno come nella coltura tradizionale. La coltura idroponica può essere 'inerte', metodo che utilizza un substrato (argilla espansa, lana di roccia ecc) che serve solo a dare supporto alle radici e non aggiunge nessun nutriente alle piante, o ad 'immersione' dove le radici sono poste direttamente nella soluzione nutritiva a base di acqua e sali minerali. In entrambi i casi è necessario predisporre un sistema di irrigazione che possa fornire costantemente la soluzione nutritiva in quanto data l'assenza di un vero e proprio terreno è ancora più importante dare alla coltivazione un costante apporto di acqua e nutrienti¹⁵ .



Figure 1: Esempio di agricoltura urbana su coperture di edifici. (fonte:www.teknoring.com)

Utilizzando un sistema idroponico, una quantità controllata di acqua e nutrienti porta ad alti tassi di crescita riducendo allo stesso tempo gli input chimici ¹⁶. Ci sono principalmente sei tipi di sistemi idroponici, quello utilizzato nella sperimentazione è il *Deep Water Culture* (DWC) che consiste nel far crescere la specie vegetale immergendola in una soluzione a base di acqua ricca di ossigeno e fertilizzante. L'acquacoltura è l'insieme di attività umane, distinte dalla pesca, praticate per la produzione controllata di organismi acquatici. Per assicurare uno sviluppo sostenibile del settore, a favore della protezione dell'ecosistema e della biodiversità, sarà necessario diminuire sempre più la pesca tradizionale a favore dell'acquacoltura, tuttavia, il suo utilizzo è accompagnato da continue preoccupazioni ecologiche. Le preoccupazioni riguardano la qualità e la sicurezza dei prodotti o le varie altre questioni ambientali, come l'alto tasso di consumo di acqua e lo scarico di acque reflue non trattate^{17 181920}. Una tipologia di acquacoltura è il sistema a ricircolo (RAS), sistema utilizzato anche in questa sperimentazione, è un impianto che riutilizza l'acqua dopo aver subito dei trattamenti meccanici e biologici. Questo sistema ha molti vantaggi quali: il risparmio di acqua, rigoroso controllo della qualità dell'acqua, alti livelli di biosicurezza e facile controllo della produzione dei rifiuti che arrecherrebbero inquinamento nell'ambiente ²⁰²¹. L'acquaponica è un sistema di coltivazione rivoluzionario e altamente efficace che combina l'acquacoltura con l'idroponica in un ambiente simbiotico ²²²³.

L'attività sperimentale

L'acquaponica può essere definita come un sistema di produzione di organismi acquatici e piante in cui la maggior parte dei nutrienti che

sostengono la crescita ottimale delle piante deriva da rifiuti provenienti dall'alimentazione degli organismi acquatici. I moderni sistemi acquaponici hanno generalmente assunto la forma di sistemi di acquacoltura a ricircolo (RAS). L'acqua, infatti, grazie all'impiego di una o più pompe, viene prelevata dalla vasca nella quale viene allevata la specie ittica e viene sottoposta ad una filtrazione fisica e biologica. La filtrazione fisica permette la rimozione di particelle solide attraverso vasche di sedimentazione o separatori meccanici²⁴, la sua efficacia determina direttamente la qualità dell'acqua e la stabilità del funzionamento del sistema. La filtrazione biologica avviene tramite un biofiltro. Quest'ultimo permette di avviare un processo di nitrificazione²⁵ che rappresenta la principale conversione dei nutrienti ovvero la trasformazione, tramite batteri nitrificanti, dell'ammoniaca (NH_3) in nitrito (NO_2) e poi in nitrato (NO_3^-) che è la forma più assimilabile dalla specie vegetale. La superficie totale disponibile per la crescita dei batteri nitrificanti determina in larga misura la capacità di rimozione dell'ammoniaca dei biofiltri²⁶. L'effluente dell'acquacoltura, caricato con sostanze nutritive, viene quindi immessa nei letti di coltura, le cui radici sono a diretto contatto con l'acqua, le quali assorbono i nutrienti e svolgono un'opera di fitodepurazione. L'acqua viene quindi riciclata e reintrodotta nella vasca di allevamento bonificata dai nutrienti accumulati. In questo processo pesci, piante e batteri prosperano in simbiosi, affinché il sistema risulti efficiente è opportuno un adeguato bilanciamento fra i tre organismi²⁷.

L'attività sperimentale è stata svolta presso il laboratorio di Ingegneria Sanitaria ambientale (SEED) dell'Università degli studi Salerno. In particolare, sono stati studiati e analizzati due sistemi acquaponici uguali per dimensioni e caratteristiche ma che si distinguono per la presenza di un'unità di trattamento. In entrambi i sistemi la specie ittica allevata è stata la Tilapia del Nilo e la specie vegetale coltivata è stata la Lattuga.

Il sistema convenzionale, denominato *Sistema 1*, è composto da un'unità di acquacoltura e un'unità idroponica. Nel sistema integrato con trattamenti avanzati, denominato *Sistema 2*, tra l'acquario di acquacoltura e la vasca idroponica sono state interposte una vasca in cui è presente una membrana auto-formante (MBR), in cui avviene il primo trattamento fisico e biologico dove contemporaneamente viene permessa una filtrazione meccanica e una degradazione biologica della sostanza organica^{28, 29, 30, 31, 32, 33, 34}, nonché una lampada UV e un'unità adibita per la disinfezione con ozono^{35, 36, 37, 38, 39, 40}. In entrambi i sistemi, inoltre, sono stati installati: un filtro che funge sia da filtrazione biologica che meccanica⁴¹, delle pompe d'aria per mantenere costante il livello di ossigeno disciolto (DO)^{42, 43, 44} all'interno delle varie unità, una mangiatoia automatica per fornire la precisa quantità di mangime ai pesci e una sorgente luminosa con timer. Il ricircolo idrico è stato semi-continuo della durata di 8 ore al giorno utilizzando due pompe peristaltiche, una per ciascun sistema acquaponico.

L'aggiunta dei trattamenti nel *Sistema II* ha permesso di svolgere operazioni in parallelo per confrontare il sistema convenzionale con quello sperimentale sotto gli aspetti di qualità delle acque⁴², della presenza e quantità dei nutrienti, di crescita e benessere della specie ittica e quella vegetale.

Il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici

L'acquaponica è un sistema a circuito chiuso e come tale ha innumerevoli vantaggi come lo scarico dei rifiuti pari a zero e il possibile riciclaggio/recupero dei nutrienti. I nutrienti possono essere suddivisi in due grandi categorie: macronutrienti (fosforo, azoto, potassio, calcio, magnesio, zolfo, carbonio) e micronutrienti (Ferro, manganese, boro, zinco, rame). Tutti i nutrienti acquaponici derivano dal mangime dei pesci dopo essere stato metabolizzato dall'apparato digerente della specie ittica: una parte viene espulsa come sostanza solubile nell'acqua, un'altra parte invece sottoforma di feci insolubili che insieme ad avanzi di mangime rimangono come fanghi di pesci negli effluenti dell'acquacoltura. Spesso si verifica una discrepanza tra i nutrienti forniti negli effluenti dell'acquacoltura e quelli richiesti dalle piante in quanto la maggior parte dei nutrienti, vengono trattenuti nei fanghi di pesce⁴⁵ che vengono rimossi dalla filtrazione meccanica. Lo sviluppo di un adeguato trattamento dei fanghi è importante per chiudere il ciclo dei nutrienti a un livello più alto e aumentare la sostenibilità dei sistemi acquaponici⁴⁶. Il trattamento dei fanghi in acquaponica deve essere affrontato in modo diverso. Infatti, nel trattamento convenzionale delle acque reflue l'obiettivo principale è ottenere un effluente decontaminato e pulito⁴⁷³⁵⁴⁸⁴⁹. Le prestazioni del trattamento sono espresse in termini di rimozione di contaminanti (es. solidi, azoto (N), fosforo (P), ecc.) dalle acque reflue. Tuttavia, nei sistemi acquaponici, le acque reflue dei pesci sono considerate una preziosa fonte di fertilizzante da preservare. Pertanto, le prestazioni di trattamento delle acque reflue non devono essere espresse in termini di rimozione dei contaminanti ma in termini di capacità di mineralizzazione dei nutrienti⁵⁰. Alcuni studi hanno dimostrato la capacità funzionale di digerire i fanghi di pesce con trattamenti aerobici e anaerobici a scopo di riduzione organica⁴⁶. Lo scopo è ottenere un effluente privo di solidi ma ricco di nutrienti solubilizzati (cioè anioni e cationi) che possono essere reinseriti nell'acqua o direttamente nei letti di crescita idroponica. Un ulteriore approccio potrebbe essere quello di andare ad agire sul processo di filtrazione meccanica e biologica utilizzando delle tecnologie e materiali che permettano di eseguire una filtrazione e rimozione dei solidi ma che vadano anche a preservare al massimo i nutrienti, evitando così ulteriori trattamenti successivi. Esempi possono essere: filtri aerati biologici (BAF) che consentono di eseguire la rimozione della materia organica e la nitrificazione in un'unica unità⁵¹ o l'utilizzo di materiali efficienti per la filtrazione biologica come il biochar (materiale carbonioso prodotto da materie prime organiche attraverso la pirolisi)che preserva

le sostanze nutritive portando un miglioramento dei parametri di qualità dell'acqua ⁵²⁵³. Infine, i nutrienti degli effluenti dell'unità di acquacoltura possono essere convertiti, tramite l'utilizzo di micro-alghe, in biomassa che può essere utilizzata come mangime della specie ittica ⁵⁴ ⁵⁵.

Conclusioni

L'evidenza sperimentale ha dimostrato che il sistema acquaponico integrato con i trattamenti avanzati ha un'efficienza migliore rispetto al sistema convenzionale con una riduzione maggiore della torbidità e aumentando il tasso di assorbimento dei nutrienti, inoltre è stato riscontrato un tasso di crescita maggiore sia della specie ittica che di quella vegetale.

In definitiva, l'acquaponica risulta essere una tecnologia emergente con un alto potenziale per la produzione alimentare sostenibile completamente biologica e innovativa, con un impatto minimo sull'utilizzo dell'acqua e con un'ottima possibilità di riciclo dei nutrienti.

References

- 1.FAO. *Food systems at risk. New trends and challenges*. (FAO CIRAD, 2019). doi:10.19182/agritrop/00080.
- 2.Springmann, M. *et al.*. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* **562**, 519–525 (2018).
- 3.Covic, N. *et al.*. All hat and no cattle: Accountability following the UN food systems summit. *Global Food Security* **30**, 100569 (2021).
- 4.Naddeo, V., Belgiorno, V., Zarra, T. & Scannapieco, D. Dynamic and embedded evaluation procedure for strategic environmental assessment. *Land Use Policy* **31**, 605–612 (2013).
- 5.Nesticò, A., Elia, C. & Naddeo, V. Sustainability of urban regeneration projects: Novel selection model based on analytic network process and zero-one goal programming. *Land Use Policy* **99**, 104831 (2020).
- 6.Scannapieco, D., Naddeo, V. & Belgiorno, V. Sustainable power plants: A support tool for the analysis of alternatives. *Land Use Policy* **36**, 478–484 (2014).
- 7.Corpuz, M. V. A. *et al.*. Viruses in wastewater: occurrence abundance and detection methods. *Science of The Total Environment* **745**, 140910 (2020).
- 8.Herrero, M. *et al.*. Articulating the effect of food systems innovation on the Sustainable Development Goals. *The Lancet Planetary Health* **5**, e50–e62 (2021).

9. Pahunang, R. R. *et al.*. Advances in technological control of greenhouse gas emissions from wastewater in the context of circular economy. *Science of The Total Environment* **792**, 148479 (2021).
10. Zarra, T., Galang, M. G., Ballesteros, F., Belgiorno, V. & Naddeo, V. Environmental odour management by artificial neural network – A review. *Environment International* **133**, 105189 (2019).
11. Herrero, M. *et al.*. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. *Nature Food* **1**, 266–272 (2020).
12. Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H. & Wang, X. A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems. *Journal of Cleaner Production* **268**, 121928 (2020).
13. Bovenzi, F. L'ingegneria sanitaria ambientale a supporto dell'agricoltura urbana per lo sviluppo di un'economia circolare . (2020) doi:10.22541/au.160340490.03649842/v1.
14. Siani, M. F. Urban farming, una soluzione per lo sviluppo sostenibile delle città. (2020) doi:10.22541/au.160349192.28203392/v1.
15. Feola, R. Trattamenti avanzati per il recupero dei nutrienti nei sistemi acquaponici: verso l'economia circolare dell'urban farming . (2021) doi:10.22541/au.162187140.08043256/v1.
16. Suárez-Cáceres, G. P. *et al.*. Susceptibility to water-borne plant diseases of hydroponic vs. aquaponics systems. *Aquaculture* **544**, 737093 (2021).
17. Ensano, B. *et al.*. Removal of Pharmaceuticals from Wastewater by Intermittent Electrocoagulation. *Water* **9**, 85 (2017).
18. Zhang, S.-Y. *et al.*. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquacultural Engineering* **45**, 93–102 (2011).
19. Scannapieco, D., Naddeo, V., Zarra, T. & Belgiorno, V. River water quality assessment: A comparison of binary- and fuzzy logic-based approaches. *Ecological Engineering* **47**, 132–140 (2012).
20. Naddeo, V., Zarra, T. & Belgiorno, V. Optimization of sampling frequency for river water quality assessment according to Italian implementation of the EU Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy* **10**, 243–249 (2007).
21. Landi, M., Naddeo, V. & Belgiorno, V. Influence of ultrasound on phenol removal by adsorption on granular activated carbon. *Desalination and Water Treatment* **23**, 181–186 (2010).
22. Muro, G. D. Verso una agricoltura urbana sostenibile: i sistemi acquaponici per il recupero e il riutilizzo delle acque . (2020) doi:10.22541/au.158525190.07859900.

- 23.Regno, M. D. Processi naturali per il recupero e il riutilizzo delle acque nei sistemi acquaponici. (2020) doi:10.22541/au.158525193.30158307.
- 24.Micco, D. D. Trattamenti avanzati delle acque per la nuova generazione di sistemi acquaponici: implementazione dell'economia circolare nell'agricoltura urbana. (2021) doi:10.22541/au.162187145.55970729/v1.
- 25.Schmautz, Z., Espinal, C. A., Smits, T. H. M., Frossard, E. & Junge, R. Nitrogen transformations across compartments of an aquaponic system. *Aquacultural Engineering* **92**, 102145 (2021).
- 26.Wei, Y. *et al.*. Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review. *IEEE Access* **7**, 169306–169326 (2019).
- 27.Lombardo, L. & Giaquinto, D. Gestione avanzata delle risorse naturali con i sistemi acquaponici: analisi tecnica ed economica . (2020) doi:10.22541/au.160322479.92556918/v1.
- 28.Pervez, M. N. *et al.*. A critical review on nanomaterials membrane bioreactor (NMs-MBR) for wastewater treatment. *npj Clean Water* **3**, (2020).
- 29.Fortunato, L., Ranieri, L., Naddeo, V. & Leiknes, T. O. Fouling control in a gravity-driven membrane (GDM) bioreactor treating primary wastewater by using relaxation and/or air scouring. *Journal of Membrane Science* **610**, 118261 (2020).
- 30.Castrogiovanni, F. *et al.*. Innovative encapsulated self-forming dynamic bio-membrane bioreactor (ESFDMBR) for efficient wastewater treatment and fouling control. *Science of The Total Environment* **805**, 150296 (2021).
- 31.Cairone, S. Nuovi processi biologici a membrane per la depurazione sostenibile delle acque reflue. (2021) doi:10.22541/au.161185838.80607936/v1.
- 32.Vassallo, V. Trattamento avanzato delle acque reflue urbane mediante bioreattori a membrane autoformanti per il controllo dei contaminanti emergenti . (2020) doi:10.22541/au.158921776.60948769.
- 33.Ibrahim, Y., Abdulkarem, E., Naddeo, V., Banat, F. & Hasan, S. W. Synthesis of super hydrophilic cellulose-alpha zirconium phosphate ion exchange membrane via surface coating for the removal of heavy metals from wastewater. *Science of The Total Environment* **690**, 167–180 (2019).
- 34.Borea, L. *et al.*. Wastewater treatment by membrane ultrafiltration enhanced with ultrasound: Effect of membrane flux and ultrasonic frequency. *Ultrasonics* **83**, 42–47 (2018).
- 35.Ensano, B. M. B. *et al.*. Applicability of the electrocoagulation process in treating real municipal wastewater containing pharmaceutical active compounds. *Journal of Hazardous Materials* **361**, 367–373 (2019).

36. Patton, S., Romano, M., Naddeo, V., Ishida, K. P. & Liu, H. Photolysis of Mono- and Dichloramines in UV/Hydrogen Peroxide: Effects on 1,4-Dioxane Removal and Relevance in Water Reuse. *Environmental Science & Technology* (2018) doi:10.1021/acs.est.8b01023.
37. Mori, J. & Smith, R. Transmission of waterborne fish and plant pathogens in aquaponics and their control with physical disinfection and filtration: A systematized review. *Aquaculture* **504**, 380–395 (2019).
38. Summerfelt, S. T., Sharrer, M. J., Tsukuda, S. M. & Gearheart, M. Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation. *Aquacultural Engineering* **40**, 17–27 (2009).
39. Naddeo, V., Scannapieco, D. & Belgiorno, V. Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment. *Journal of Hydrology* **498**, 287–291 (2013).
40. Naddeo, V., Landi, M., Belgiorno, V. & Napoli, R. M. A. Wastewater disinfection by combination of ultrasound and ultraviolet irradiation. *Journal of Hazardous Materials* **168**, 925–929 (2009).
41. Cripps, S. J. & Bergheim, A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* **22**, 33–56 (2000).
42. Yildiz, H. Y. *et al.* Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water* **9**, 13 (2017).
43. Suhl, J. *et al.* Oxygen consumption in recirculating nutrient film technique in aquaponics. *Scientia Horticulturae* **255**, 281–291 (2019).
44. Ren, Q., Zhang, L., Wei, Y. & Li, D. A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system. *Computers and Electronics in Agriculture* **151**, 384–391 (2018).
45. Strauch, S. *et al.* Commercial African Catfish (*Clarias gariepinus*) Recirculating Aquaculture Systems: Assessment of Element and Energy Pathways with Special Focus on the Phosphorus Cycle. *Sustainability* **10**, 1805 (2018).
46. Goddek, S. & Keesman, K. J. The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. *Desalination* **428**, 76–85 (2018).
47. Naddeo, V., Zarra, T. & Belgiorno, V. A comparative approach to the variation of natural elements in Italian bottled waters according to the national and international standard limits. *Journal of Food Composition and Analysis* **21**, 505–514 (2008).

48. Naddeo, A. C. V. Wastewater Treatment by Combination of Advanced Oxidation Processes and Conventional Biological Systems. *Journal of Bioremediation & Biodegradation* **04**, (2013).
49. Ali, A. A. A., Naddeo, V., Hasan, S. W. & Yousef, A. F. Correlation between bacterial community structure and performance efficiency of a full-scale wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering* **37**, 101472 (2020).
50. Monsees, H., Keitel, J., Paul, M., Kloas, W. & Wuertz, S. Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquaculture Environment Interactions* **9**, 9–18 (2017).
51. Zhang, H. *et al.*. Recovery of nutrients from fish sludge in an aquaponic system using biological aerated filters with ceramsite plus lignocellulosic material media. *Journal of Cleaner Production* **258**, 120886 (2020).
52. Su, M. H. *et al.*. Simultaneous removal of toxic ammonia and lettuce cultivation in aquaponic system using microwave pyrolysis biochar. *Journal of Hazardous Materials* **396**, 122610 (2020).
53. Khiari, Z., Alka, K., Kelloway, S., Mason, B. & Savidov, N. Integration of Biochar Filtration into Aquaponics: Effects on Particle Size Distribution and Turbidity Removal. *Agricultural Water Management* **229**, 105874 (2020).
54. Han, P., Lu, Q., Fan, L. & Zhou, W. A Review on the Use of Microalgae for Sustainable Aquaculture. *Applied Sciences* **9**, 2377 (2019).
55. Gao, F. *et al.*. Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal. *Ecological Engineering* **92**, 55–61 (2016).