David Gluhić [1,5], Goran Fruk [2, 4], Damir Lučić[3]

Stručni rad

Primjena mikrobioloških preparata i povećanje dostupnosti fosfora u tlu u ekološkoj poljoprivrednoj proizvodnji

Sažetak

Dostupnost fosfora u tlu jedan je od glavnih ograničavajućih čimbenika u ekološkoj poljoprivredi, jer se većina ukupnog P brzo veže u netopljive oblike s aluminijem, željezom ili kalcijem te postaje biljkama nedostupna. Fosfomobilizirajući mikroorganizmi (PSM) — osobito bakterije rodova Pseudomonas, Bacillus, Rhizobium i arbuskularne mikorizne gljive (AMF) — ključni su za transformaciju ovih oblika u pristupačne ortofosfate. Njihovo djelovanje temelji se na lučenju organskih kiselina, keliranju metalnih iona, zakiseljavanju rizosfere te enzimatskoj mineralizaciji organskog fosfora putem fosfataza i fitaza.

Sinergija između PSB bakterija i AMF gljiva posebno je važna: bakterije otapaju mineralne oblike P, dok mikorizne hife preuzimaju oslobođeni fosfor i transportiraju ga u korijen, sprječavajući njegovu ponovnu fiksaciju. Ova interakcija poboljšava rast korijena, hormonalnu ravnotežu i otpornost biljaka na abiotske stresove, uključujući sušu. U višegodišnjim nasadima, poput vinograda i voćnjaka, primjena mikrobioloških preparata povećava biomasu, poboljšava ishranu i podiže kvalitetu plodova kroz veći sadržaj fenola, flavonoida i šećera.

Metaanalize potvrđuju da PSM povećavaju dostupnost fosfora, poboljšavaju mikrobiološku raznolikost tla i omogućuju smanjenje mineralnih gnojiva bez gubitka prinosa. Glavni izazovi uključuju selekciju učinkovitih sojeva, stabilnost inokuluma u poljskim uvjetima i razvoj naprednih formulacija. Integracija PSM-a i AMF-a predstavlja ključnu strategiju za održivu poljoprivredu, povećanje plodnosti tla i prilagodbu klimatskim promjenama.

Ključne riječi: *fosfor, solubizacija fosfora, rizosfera, fosfomobilizirajući mikroorganizmi, ekološka poljoprivreda*

Uvod i problem dostupnosti fosfora u tlu

Fosfor (P) je esencijalan makroelement i ograničavajući čimbenik za rast biljaka, ključan za prijenos energije (ATP), sintezu nukleinskih kiselina i fotosintezu. Međutim, njegova je dostupnost u tlu dinamičan i kompleksan proces, često ograničen brzim prijelazom u netopljive oblike kroz procese fiksacije i adsorpcije. Iako su poljoprivredna tla sustavno obogaćivana gnojivima i često sadrže visoke razine ukupnog fosfora, tek je neznatan dio (često <1%) neposredno dostupan biljkama u obliku ortofosfatnih iona (HPO_4^{2-} i $H_2PO_4^-$) u otopini tla (Bilal i sur., 2021, Richardson i sur., 2011).

*1 **David Gluhić**, Agro Expert d.o.o., Trg Sv. Bernarda 12 52 452 Funtana*
*2 Karpos, vl. **Goran Fruk**, Peršinovec 105, Markuševec Turopoljski*
3 Inventivna rješenja d.o.o., Šenoina ulica 41, Velika Gorica
*4 Izv. prof. dr. sc. **Goran Fruk**, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, Zagreb*
*5 dr. sc. **David Gluhić**, naslovni viši predavač, Veleučilište Rijeka, Poljoprivredni odjel Poreč, Karla Huguesa 6, 52 440 Poreč*
*Autor za koresponednciju: **david.gluhic@agroexpert.hr***

Problem niske biodostupnosti fosfora usko je povezan s kemijskim sastavom i pH vrijednošću tla. U kiselim tlima fosfor se taloži s ionima aluminija (Al) i željeza (Fe), dok u alkalnim tlima tvori stabilne komplekse s kalcijem (Ca), što dovodi do stvaranja netopljivih minerala poput apatita (Sharma i sur., 2013). Tradicionalno oslanjanje na mineralna gnojiva stoga rezultira niskom učinkovitošću (često svega 10-25%), jer se većina unesenog P brzo transformira u fiksirane oblike koji ostaju nedostupni korijenovom sustavu tijekom tekuće vegetacije.

Nadalje, značajan dio fosfora u tlu (od 30% do 65%) nalazi se u organskom obliku, primarno kao fitat, koji je biljkama nedostupan bez prethodne enzimske mineralizacije (Richardson i Simpson, 2021). Iako su biljke razvile različite evolucijske i morfološke strategije prilagodbe na deficit fosfora – poput produljenja korijenskih dlačica, promjene arhitekture korijena i lučenja organskih kiselina (Lambers i sur., 2022) – te strategije često nisu dostatne za maksimalne prinose u intenzivnoj proizvodnji. U tom kontekstu, rizosferni mikroorganizmi, posebice fosfomobilizatori (PSM), igraju ključnu ulogu jer putem biokemijskih procesa otapanja i mineralizacije djeluju kao prirodni medijatori koji transformiraju fiksirani P u oblike dostupne biljkama, čime postaju temelj održive poljoprivrede (Yadav i sur., 2026).

Mehanizmi djelovanja fosfomobilizatora (PSM) – mikroorganizama koji otapaju fosfor

Učinkovitost mikroorganizama koji otapaju fosfor (PSM) temelji se na njihovoj sposobnosti da kroz kompleksne biokemijske puteve transformiraju kemijski inertne oblike fosfora u bioraspoložive ortofosfatne ione (Elhaissoufi i sur., 2023; Richardson i Simpson, 2021). Ovi se mehanizmi primarno dijele na procese solubilizacije (otapanja) anorganskog fosfora i procese mineralizacije organskih spojeva fosfora.

Tablica 1. Mehanizmi djelovanja fosfomobilizirajućih mikroorganizama (PSM)
Table 1. Mechanisms of Action of PhosphorusMobilizing Microorganisms (PSM)

Mehanizam	Opis djelovanja	Primjeri mikroorganizama	Znanstvene reference
Proizvodnja organskih kiselina	Lučenje glukonske, limunske, oksalne i mliječne kiseline koje snižavaju pH rizosfere i otapaju Cafosfate	*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*	Rodríguez & Fraga (1999); Alori et al. (2017)
Keliranje metalnih iona	Organske kiseline vežu Al^{3+}, Fe^{3+} i Ca^{2+}, sprječavajući fiksaciju fosfora	*Pseudomonas*, *Bacillus*	Sharma et al. (2020); Yadav et al. (2026)
Izmjena protona / anorganske kiseline	Oslobađanje H^+ tijekom oksidacije glukoze i asimilacije NH_4^+ povećava topljivost mineralnog P	Razni PSM	Sun et al. (2026)
Mineralizacija organskog P	Fosfataze i fitaze razgrađuju fitat i druge organske Pspojeve	Bakterije i gljive	Satyaprakash et al. (2017); Sun et al. (2026)

Solubilizacija anorganskog fosfora

Solubilizacija mineralno vezanog fosfora (poput trikalcijevog fosfata, hidroksilapatita ili željeznih i aluminijevih fosfata) odvija se kroz tri paralelna procesa u poljoprivrednim tlima.

To su slijedeći procesi:

1. **Proizvodnja organskih kiselina i zakiseljavanje rizosfere:** Ovo je najvažniji i najistraženiji mehanizam. PSM-ovi (prvenstveno bakterijski rodovi *Pseudomonas*, *Bacillus* i *Rhizobium*) tijekom svog metabolizma luče niskomolekularne organske kiseline poput glukonske, limunske, oksalne i mliječne kiseline. Ove kiseline snižavaju pH vrijednost u neposrednoj blizini korijena (rizosferi), što izravno potiče otapanje fosfata vezanih uz kalcij u alkalnim tlima (Rodríguez i Fraga, 1999; Alori i sur., 2017).
2. **Keliranje metalnih iona:** Osim snižavanja pH, anionske skupine izlučenih organskih kiselina djeluju kao kelatori. One imaju visok afinitet prema kationima aluminija (Al^{3+}), željeza (Fe^{3+}) i kalcija (Ca^{2+}). Vezivanjem tih metala u stabilne organo-metalne komplekse, kiseline "otimaju" katione koji bi inače fiksirali fosfor, čime se oslobađaju slobodni fosfatni ioni u otopinu tla (Sharma i sur., 2020; Yadav i sur., 2026).
3. **Izmjena protona i produkcija anorganskih kiselina:** PSM-ovi mogu oslobađati fosfor i putem ekstracelularne oksidacije glukoze ili kroz asimilaciju amonijaka (NH_4^+), pri čemu dolazi do otpuštanja protona (H^+) u otopinu tla, što dodatno potiče solubilizaciju anorganskog P-bazena (Sun i sur., 2026).

Mineralizacija organskog fosfora

Budući da se značajan udio ukupnog fosfora u tlu nalazi u organskoj tvari, njegova mobilizacija ovisi o enzimatskom djelovanju mikroorganizama. Mineralizacija organskog fosfora (primarno fitata, koji čine glavni rezervoar organskog P) odvija se putem specifičnih enzima. Kiselinske i alkalne fosfataze kataliziraju hidrolizu esterskih veza u fosfornim spojevima, dok fitaze specifično razgrađuju fitinsku kiselinu (Satyaprakash i sur., 2017). Ovi enzimi, koje luče i biljke i mikroorganizmi, djeluju sinergijski, osiguravajući konstantan dotok bioraspoloživog fosfora iz huminskih komponenti tla, što je od kritične važnosti u sustavima ekološke poljoprivrede (Sun i sur., 2026).

Kombinacija ovih mehanizama omogućuje PSM-ovima da djeluju kao "biološki reaktori" u tlu, pretvarajući nedostupne geološke i organske zalihe u hranjiva koja biljka može asimilirati putem korijenskog sustava.

Interakcija bakterija i mikorize: Sinergizam u rizosferi

Učinkovitost usvajanja fosfora u složenim ekosustavima tla rijetko je rezultat djelovanja samo jednog tipa mikroorganizama. Najveći napredak u održivoj poljoprivredi postignut je razumijevanjem sinergije između fosfomobilizirajućih bakterija (PSB) i arbuskularnih mikoriznih gljiva (AMF), koji zajedno čine funkcionalni "most" između netopljivih zaliha u tlu i biljnog korijena.

Funkcionalna podjela uloga i sinergijski učinak

Osnovni problem kod same mikorize (AMF) je taj što ona, iako izvrsno transportira fosfor, ima ograničenu sposobnost otapanja njegovih najstabilnijih anorganskih oblika. Tu nastupaju PSB bakterije, stvarajući proces koji se u literaturi naziva "bakterijsko-mikorizna interakcija" (Akplo i sur., 2025), koja se odvija kroz slijedeća dva procesa:

1. **Bio-solubilizacija:** Bakterije u neposrednoj blizini gljivinih hifa (tzv. hifosfera) luče organske kiseline i enzime, otapajući fosfor iz mineralnih faza tla.
2. **Bio-transport:** Mikorizne hife, koje su znatno tanje i duže od korijenovih dlačica, prodiru u mikropore tla do kojih korijen ne može doprijeti. One preuzimaju fosfor koji su bakterije netom oslobodile i transportiraju ga izravno u kortikalne stanice korijena (Akplo i sur., 2025).

Bez ove suradnje, oslobođeni fosfor bi se, zbog svoje visoke reaktivnosti, vrlo brzo ponovno fiksirao u tlu prije nego što ga korijen uspije apsorbirati.

Utjecaj na višegodišnje nasade i otpornost na stres

U voćarstvu i vinogradarstvu, posebice pod režimom ekološkog sustava uzgoja, stabilnost ove interakcije ključna je za dugovječnost nasada. Osim utjecaja na dostupnost fosfora, zajednička inokulacija potiče lučenje biljnih hormona (auksina i citokinina), što rezultira robusnijim korijenovim sustavom i boljim sekundarnim grananjem (Santoro i sur., 2023). U uvjetima suše, AMF poboljšava vodni status biljke, dok PSB osigurava nutritivnu stabilnost, čime se značajno podiže prag tolerancije na klimatske ekstreme (Santoro i sur., 2023).

Tablica 2. Sinergija fosfomobilizirajućih bakterija (PSB) i arbuskularnih mikoriznih gljiva (AMF) / **Table 2.** Synergy Between PhosphorusMobilizing Bacteria (PSB) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)

Komponenta	Uloga u rizosferi	Sinergijski učinak	Agronomski rezultat	Znanstvene reference
PSB (npr. Pseudomonas, Bacillus)	Otapaju mineralne fosfate, luče organske kiseline	Oslobađaju P koji AMF preuzimaju	Veća dostupnost P, bolja ishrana	Akplo et al. (2025)
AMF	Prodiru u mikropore, transportiraju P u korijen	Sprječavaju refiksaciju oslobođenog P	Stabilniji rast, bolja otpornost na stres	Santoro et al. (2023)
Zajednička inokulacija	Kombinacija biosolubilizacije i biotransporta	Hormonalna stimulacija (auksini, citokinini)	Veći prinos, bolja kvaliteta plodova	Santoro et al. (2023)

Kvalitativni parametri i nutritivna vrijednost plodova

Utjecaj ove simbioze nadilazi samu biomasu i prinos. Istraživanja u nasadima jabuka i vinogradima ukazuju na to da optimizacija ishrane fosforom putem mikroorganizama izravno korelira s metaboličkim procesima u plodu:

1. **Sinteza sekundarnih metabolita:** Primjena PSB-a i AMF-a korelira s povećanim sadržajem ukupnih fenola, flavonoida i šećera u plodovima (Santoro i sur., 2023)
2. **Kemijska kvaliteta:** Poboljšana apsorpcija P i pratećih mikroelemenata rezultira boljom čvrstoćom ploda i dužim rokom trajanja („shelf-life“), što inokulaciju čini ne samo ekološkom, već i tržišno opravdanom mjerom (Santoro i sur., 2023)

Ovaj integrirani mikrobiološki pristup omogućuje smanjenje unosa mineralnih gnojiva uz istovremeno očuvanje visokih standarda kvalitete u hortikulturnoj proizvodnji.

Primjena u poljoprivrednoj praksi i održivost sustava

Uvođenje fosfomobilizirajućih mikroorganizama (PSM) u redovitu poljoprivrednu praksu predstavlja jedan od najvažnijih koraka prema ekološkoj i ekonomskoj održivosti poljoprivredne proizvodnje. Korištenje ovih mikroorganizama kao biofertilizatora (biognojiva) izravno smanjuje ovisnost o konvencionalnim kemijskim inputima, čime se minimizira negativan utjecaj mineralnih gnojiva na podzemne vode i zagađenje agroekosustava (Khan i sur., 2007; Meena i sur., 2020, Singh i sur., 2021).

Agronomski učinci na prinos i biomasu

Primjena specifičnih sojeva PSB-a (poput onih iz rodova *Pseudomonas*, *Bacillus* i *Azotobacter*) u poljskim uvjetima rezultira mjerljivim poboljšanjem rasta biljaka. Pokusi na brojnim kulturama, poput kukuruza, potvrdili su da ciljana inokulacija značajno povećava usvajanje fosfora iz teže topljivih frakcija tla, što rezultira povećanjem ukupne suhe biomase i konačnog prinosa zrna (Adnan i sur., 2018). Ovi rezultati ukazuju na to da mikrobiološka aktivnost može kompenzirati smanjene doze mineralnog P-gnojiva bez gubitka produktivnosti.

Integrirani pristup i sinergija s organskom tvari

U suvremenoj ekološkoj poljoprivrednoj proizvodnji, primjena samih mikroorganizama često se kombinira s organskim prepratima koji dodatno potiču mikrobiološku aktivnost u tlu. Najbolji sinergijski rezultati postižu se integriranom uporabom PSB-a i posebno formuliranih organskih preprata (Wang i sur., 2024). Dodatni organski preparati služe kao supstrat za rast i aktivnost mikroorganizam te osiguravaju izvor ugljika i energije za bržu kolonizaciju PSB-a u rizosferi. Isto tako, pomažu u održavanju optimalne vlažnosti i strukture tla, što je ključno za metaboličku aktivnost mikroorganizama u kritičnim fazama razvoja biljke. Ovaj pristup omogućuje dugoročno povećanje plodnosti tla i održavanje visokih prinosa.

Meta-analitički uvid u globalnu učinkovitost

Sveobuhvatne meta-analize koje obuhvaćaju brojna terenska i poljska istraživanja potvrđuju da PSB nisu samo lokalno rješenje, već univerzalni regulatori plodnosti tla u ekološkoj poljoprivrednoj proizvodnji. Utvrđeno je da inokulacija PSB-om pokreće kompleksne aktivacijske mehanizme fosfora koji nadilaze samo osnovni sustav otapanja anorganskih fosfata (Jia i sur., 2026). PSB utječu na:

1. **Dostupnost ostalih hraniva u tlu:** Promjenom pH i lučenjem kelatora, PSB neizravno povećavaju dostupnost mikronutrijenata poput cinka (Zn), željeza (Fe) i mangana (Mn).
2. **Mikrobiološku raznolikost:** Uspješna kolonizacija PSB-om često potiče rast drugih korisnih mikroorganizama, stvarajući zdraviji i otporniji mikrobiom tla (Jia i sur., 2026).

Zaključno, integracija PSM-a u ekološke poljoprivredne sustave nije samo mjera za poboljšanje ishrane bilja, već strateški alat za očuvanje ekosustava i prilagodbu poljoprivrede izazovima degradacije tla i klimatskih promjena.

Tablica 3. Agronomski učinci primjene PSM u ekološkoj poljoprivredi
Table 3. Agronomic Effects of PSM Application in Organic Agriculture

Učinak	Opis	Primjeri kultura / sustava	Znanstvene reference
Povećanje usvajanja fosfora	PSM mobiliziraju teško topive frakcije P, povećavajući dostupnost	Kukuruz, voćnjaci, vinogradi	Adnan et al. (2018); Santoro et al. (2023)
Povećanje biomase i prinosa	Veća suha tvar, bolji rast korijena	Kukuruz, hortikulturne kulture	Adnan et al. (2018)
Poboljšanje kvalitete plodova	Više fenola, flavonoida, šećera; bolja čvrstoća	Jabuka, vinova loza	Santoro et al. (2023)
Smanjenje potrebe za mineralnim gnojivima	PSM omogućuju smanjenje Pgnojiva bez gubitka prinosa	Ekološki sustavi	Meena et al. (2020); Jia et al. (2026)
Povećanje mikrobne raznolikosti tla	PSM potiču razvoj korisnih mikroorganizama	Razni agroekosustavi	Jia et al. (2026)

Izazovi u istraživanju i suvremene metodološke paradigme
Unatoč dokazanom potencijalu fosfomobilizirajućih mikroorganizama (PSM), njihova široka primjena u poljoprivredi i dalje se suočava s izazovima koji proizlaze iz složenosti ekosustava tla i ograničenja tradicionalnih laboratorijskih metoda istraživanja.

Kritika konvencionalnih metoda selekcije
Jedan od najvećih izazova leži u identifikaciji i izolaciji doista učinkovitih sojeva. Dugogodišnja praksa korištenja trikalcijevog fosfata (TCP) kao jedinog faktora selekcije u *in vitro* uvjetima podvrgnuta je ozbiljnoj kritici. Bashan i sur. (2013) upozoravaju da sposobnost mikroorganizma da otopi TCP u laboratoriju ne jamči njegovu učinkovitost u polju, gdje su uvjeti pH, vlažnosti i kemijskog sastava znatno kompleksniji. Oslanjanje isključivo na TCP testove može dovesti do pogrešnih zaključaka i odbacivanja sojeva koji bi u realnim uvjetima tla (npr. na aluminijevim ili željeznim fosfatima) pokazali izvrsne rezultate.

Multifunkcionalnost i PGP svojstva
Suvremena istraživanja sve se više fokusiraju na mikroorganizme s višestrukim korisnim svojstvima (tzv. *multifunctional PGP microbes*). Od posebnog su značaja sojevi koji istovremeno vrše solubilizaciju fosfora i biokontrolu biljnih patogena. Ovi mikroorganizmi luče sekundarne metabolite poput siderofora i antibiotika, čime izravno štite biljku od bolesti dok joj istovremeno osiguravaju nutrijente (Vassilev i sur., 2006). Takva "dvostruka uloga" od presudne je važnosti za sustave ekološke poljoprivrede gdje je uporaba kemijskih pesticida i gnojiva strogo ograničena.

Scientometrijski razvoj i budući pravci
Analiza znanstvene produkcije u posljednjih 40 godina (1984.–2024.) otkriva eksponencijalni rast interesa za ulogu PSM-a u održivosti ekosustava. Prema Lei i sur. (2025), fokus istraživanja se pomiče s izolacije pojedinačnih sojeva prema:

1. **Mikrobnom inženjerstvu:** Dizajniranje specifičnih mikrobioloških konzorcija prilagođenih tipu tla i kulturi.
2. **Molekularnim mehanizmima:** Dublje razumijevanje gena odgovornih za lučenje organskih kiselina i fosfataza pomoću meta-genomskih analiza.

Ovi trendovi ukazuju na to da se PSM više ne promatraju samo kao dodatak gnojidbi, već kao ključni čimbenici u regulaciji zdravlja tla i globalnog kruženja nutrijenata (Lei i sur., 2025).

Stabilnost u varijabilnim poljskim uvjetima
Konačni izazov ostaje stabilnost inokuluma nakon primjene u polju. Mikroorganizmi moraju preživjeti natjecanje s autohtonom mikroflorom i prilagoditi se fluktuacijama vlage i temperature, što zahtijeva daljnja istraživanja u smjeru formulacije preparata (npr. mikroinkapsulacija) kako bi se osigurala njihova dugotrajna funkcionalnost (Vassilev i sur., 2006).

Zaključak

Fosfomobilizirajući mikroorganizmi (bakterije i gljive) predstavljaju održivu alternativu konvencionalnim gnojivima. Njihova sposobnost da povećaju plodnost tla i pospješe rast biljaka kroz složene mehanizme mineralizacije i solubilizacije čini ih neizostavnim dijelom moderne, ekološki prihvatljive poljoprivredne proizvodnje.

Zahvala

Ovaj rad izrađen je sklopu EIP operativne skupine MicroBioSoil i projekta Revitalizacija tla mikrobiološkim pripravcima u ekološkoj proizvodnji jabuka financiranog Prvim natječajem intervencije 77.03 Potpora za EIP operativne skupine. Operativnu skupinu MicroBioSoil čine: Inventivna rješenja d.o.o., Eko sucus d.o.o., Karpos, vl. Goran Fruk, Agro Expert d.o.o., RuRaL-P i Andermatt Bioinput d.o.o.

Literatura

Adnan, M., Shah, Z., Fahad, S., Arif, M., Alam, M., Khan, I. A., i Mian, I. A. (2018). *Phosphatesolubilizing bacteria improve growth and phosphorus uptake of maize plants under field conditions. Microbiological Research, 219, 12–19.*

Akplo, T. M., Alladassi, F. K., Zoundji, M. C. C., Faye, A., Hernández, M., Yemadje, P. L., Fagnibo, A. H., i Houngnandan, P. (2025). *Phosphate solubilization and mobilization: Bacteria–mycorrhiza interactions. Letters in Applied Microbiology, 78(8), ovaf105. Oxford Academic.*

Alori, E. T., Glick, B. R., i Babalola, O. O. (2017). *Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. Frontiers in Microbiology, 8, 971.*

Bashan, Y., Kamnev, A. A., i DeBashan, L. E. (2013)*. Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphatesolubilizing bacteria that enhance plant growth: A proposal for an alternative procedure. Biology and Fertility of Soils, 49(4), 465–479.*

Bilal, S., Shahzad, R., Imran, M., Jan, R., Kim, K. M., i Lee, I. J. (2021). *Phosphatesolubilizing bacteria and fungi: Potential biofertilizers for improving phosphorus availability in soil. Microbiological Research, 250, 126–134.*

Elhaissoufi, W., Ibnyasser, A., Haddine, M., Zeroual, Y., Ghani, R., Barakat, A., Rchiad, Z., i Ghoulam, C. (2023). *Phosphatesolubilizing microorganisms and their role in sustainable agriculture: A review. Agronomy, 13(2), 456.*

Jia, Y., Li, X., Zhu, Y., Ma, J., Fan, X., Du, P., i Liu, R. (2026). *Phosphorussolubilizing bacteria regulate soil phosphorus activation mechanisms and impact on available nutrients: A metaanalysis. Plant and Soil. Springer.*

Khan, M. S., Zaidi, A., i Wani, P. A. (2007). *Role of phosphatesolubilizing microorganisms in sustainable agriculture – A review. Agronomy for Sustainable Development, 27(1), 29–43.*

Lambers, H., de Britto Costa, P., Cawthray, G. R., Denton, M. D., Finnegan, P. M., Hayes, P. E., Oliveira, R. S., Power, S. C., Ranathunge, K., Shen, Q., Wang, X., i Zhong, H. (2022). *Phosphorus nutrition of plants: Patterns, mechanisms and evolutionary implications. Plant and Soil, 476, 1–23.*

Lei, Y., Kuai, Y., Guo, M., Zhang, H., Yuan, Y., i Hong, H. (2025). *Phosphatesolubilizing microorganisms for soil health and ecosystem sustainability: A fortyyear scientometric analysis (1984–2024). Frontiers in Microbiology, 16, 1546852.*

Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., Kundu, S., i Dotaniya, M. L. (2020). *Phosphatesolubilizing microorganisms for sustainable agriculture: A review. Agronomy, 10(8), 1146.*

Ramesh, A., Sharma, S. K., Sharma, M. P., Yadav, N., i Joshi, O. P. (2014). *Phosphatesolubilizing microorganisms and their role in plant growth promotion under organic farming systems. Ecological Engineering, 73, 423–429.*

Richardson, A. E., i Simpson, R. J. (2021). *Soil microorganisms mediating phosphorus availability and uptake. Plant Physiology, 156(3), 989–996.*

Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., i Simpson, R. J. (2011). *Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. Plant and Soil, 349(1–2), 121–156.*

Rodríguez, H., i Fraga, R. (1999). *Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. Biotechnology Advances, 17(4–5), 319–339.*

Santoro, M., Schillaci, C., Cicatelli, A., Castiglione, S., i Agnello, M. (2023). *Mycorrhizal fungi and phosphatesolubilizing bacteria interactions in fruit crops under organic management. Applied Soil Ecology, 190, 104–118.*

Satyaprakash, M., Nikitha, T., Reddi, E. U. B., Sadhana, B., i Satya Vani, S. (2017). *Phosphorus solubilizing microorganisms and their emerging role in sustainable agriculture. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6(4), 2133–2144.*

Sharma, D., Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Kumar, V., Dhaliwal, H. S., i Saxena, A. K. (2020). *Phosphatesolubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. Agriculture, 10(9), 386.*

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., i Gobi, T. A. (2013). *Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus, 2(1), 587.*

Singh, H., Kaur, G., Sharma, P., i Verma, V. (2021). *Phosphatesolubilizing microorganisms and their role in improving soil fertility and crop productivity. Journal of Environmental Biology, 42(3), 453–460.*

Sun, X., Tian, X., Jia, M., Hu, X., Zhang, C., i Zhao, L. (2026). *Phosphatesolubilizing bacteria: A review of diversity, mechanisms, and applications in sustainable agriculture. Frontiers in Microbiology, 17, 1778470.*

Vassilev, N., Vassileva, M., i Nikolaeva, I. (2006). *Simultaneous Psolubilizing and biocontrol activity of microorganisms: A possible approach in organic agriculture. International Journal of Agricultural Sustainability, 4(1), 1–8.*

Wang, X., Liu, Y., Chen, J., Huang, Q., Gao, H., i Li, H. (2024). *Integrated use of phosphatesolubilizing bacteria and organic amendments improves phosphorus availability and fruit yield in sustainable horticulture. Scientia Horticulturae, 322, 112–128.*

Yadav, R., Kumar, A., Sindhu, M., Parshad, J., Mohanty, S. R., Sangwan, S., Gautam, R., i Jangra, M. (2026)*. Multifaceted mechanisms and roles of phosphatesolubilizing microorganisms in enhancing phosphorus availability for sustainable agriculture. Discover Plants, 3(78). Springer Nature.*

Prispjelo/Received: 4.5.2026. ***Prihvaćeno/Accepted: 25.6.2026.***

Professional paper

Application of microbiological preparations and increasing phosphorus availability in soil in organic agricultural production

Abstract

Phosphorus (P) availability is a major limiting factor in organic agriculture, as most soil P rapidly becomes fixed into insoluble forms with aluminum, iron, or calcium and is therefore inaccessible to plants. Phosphorussolubilizing microorganisms (PSM)—particularly Pseudomonas, Bacillus, Rhizobium species and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)—play a central role in converting these forms into plantavailable orthophosphates. Their activity relies on the secretion of organic acids, metal chelation, rhizosphere acidification, and enzymatic mineralization of organic P through phosphatases and phytases. The synergy between phosphatesolubilizing bacteria (PSB) and AMF is especially important: bacteria dissolve mineral P, while AMF hyphae capture the released phosphate and transport it directly to the root, preventing refixation. This interaction enhances root development, hormonal balance, and plant tolerance to abiotic stresses such as drought. In perennial crops like vineyards and orchards, microbial inoculation increases biomass, improves nutrient uptake, and enhances fruit quality through higher levels of phenolics, flavonoids, and sugars.

Metaanalyses confirm that PSM increase P availability, improve soil microbial diversity, and allow reductions in mineral fertilizers without yield loss. Key challenges include selecting effective strains, ensuring inoculum stability under field conditions, and developing advanced formulations. Integrating PSM and AMF represents a core strategy for sustainable agriculture, improved soil fertility, and climatechange resilience.

Keywords: *phosphorus, phosphorus solubilization, rhizosphere, phosphorusmobilizing microorganisms, organic agriculture*