

# Disanje tla kao indikator njegovog zdravlja

prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović

*Mikrobne zajednice tla ključne su za funkcioniranje kopnenih ekosustava i vitalne su za život na našoj planeti jer jedan od glavnih tokova kopnenih ekosustava globalni ciklus ugljika u koji je uključeno disanje (respiracija) tla.* One imaju važnu i aktivnu ulogu u plodnosti tla jer obavljaju transformaciju hranjivih tvari (npr., mineralizacija i imobilizacija organske tvari, biološka fiksacija  $N_2$  iz zraka itd.), ali i sintetiziraju kompleksne tvari koje utječu na rast i razvitak bilja. *Dakle, mikrobi u tlu, a naročito u rizosferi, osiguravaju biljkama esencijalne hranjive tvari, vitamine i regulatore rasta, pokazuju jak antagonizam prema biljnim patogenima i tako stimuliraju obranu biljaka od štetočina i bolesti.* Također, mikrobiološki procesi proizvode *staklenički plinovi* zahtijevaju bolje poznavanje njihove funkcije jer je to ključno za smanjenje emisija plinova koji utječu na klimatske promjene.

*Biogenost tla* predstavlja ukupnost svih živih organizama koji žive u tlu (*edafon*), uključujući biljke, životinje i mikroorganizme, a može se procijeniti na više načina, npr., preko brojnosti ili mase mikroorganizama u tlu, mjerenjem mikrobiološke aktivnosti, utvrđivanjem organske tvari i brzine njene razgradnje, preko intenziteta mineralizacije dušika ili njegove biološke fiksacije itd. *Razina biogenost tla može se relativno dobro i praktično procijeniti prema brzini razlaganja žetvenih ostataka, siderata i organskih gnojiva.* Naime, biogenost tla je dobra ako slijedeće vegetacijske godine nema ostataka žetvenih ostataka u oraničnom sloju, osrednja ako slijedeće godine ima malo teže razgradljivih žetvenih ostataka (npr. kukuruzovine, stabljike suncokreta i sl.), a loša kad oranični sloj sadrži lakorazgradljive žetvene ostatke, npr. slamu žitarica, lišće ili korijen šećerne repe, gomolje krumpira, ostatke zelene gnojidbe i sl.. Budući da su mikroorganizmi slabo aktivni ispod  $10^{\circ}C$  i iznad  $35-40^{\circ}C$ , organska gnojiva imaju slab učinak pri nižim temperaturama, ali i u suhim ili suviše vlažnim uvjetima i niskom sadržaju organske tvari tla, odnosno uvijek kad je biogenost tla niska. Stoga se, obzirom na dozu i vrijeme primjene organskih gnojiva, mora uvažiti dobru poljoprivrednu praksu, jer primjerice, *previše organskog gnojiva u povoljnim uvjetima mineralizacije organske tvari može snažno potaknuti njegovu mikrobiološku aktivnost što će rezultirati s više hranjivih tvari nego biljke mogu usvojiti iz tla*, izazvati gubitak hraniva i često onečišćenje okoliša. Suprotno, pri nepovoljnim uvjetima (npr., pri nižim temperaturama, niskoj pH ili u sušnim uvjetima tla) biljke neće imati dovoljno raspoloživih elemenata ishrane.

*Disanje (respiracija) tla* je dobar opći pokazatelj njegove plodnosti (*zdravlja*) jer je proporcionalno brojnosti i aktivnosti mikroorganizama koji koriste organsku tvar kao izvor energije i ugljika pri čemu se oslobađa ugljični dioksid koji difundira u atmosferu. Zbog toga se disanje tla često koristi kao brz, jeftin i jednostavan način za procjenu biogenosti, odnosno zdravlja tla, u laboratorijskim, kao i poljskim uvjetima. Ovisno od tipa tla, njegovih fizikalno-kemijsko-bioloških svojstava, načina njegove eksploatacije, vegetacije, klime i dr., mjerenja respiracije tla pokazuju značajne vremenske i prostorne varijacije. Vremenske promjene uglavnom ovise od temperature i vlažnosti tla koji kontroliraju proizvodnju  $CO_2$  što je najčešće u čvrstoj i pozivnoj korelaciji s produktivnosti kopnenih ekosustava i brzini razgradnje organske tvari tla. *Količina  $CO_2$  koja se oslobodi disanjem iz obrađenog tla iznosi  $80-900\text{ mg } CO_2\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$*  (ovisno o temperaturi, vlazi, pH, količini organske tvari u tlu itd.). Budući da je *u većini tala više od 90 % ukupnog dušika i sumpora, kao i više od 50 % ukupnog fosfora povezano s organskom tvari tla i mikrobiološkom aktivnosti, agroekološki i antropogeni utjecaji dramatično mogu promijeniti cikluse hranjivih tvari u tlu.*

*Jedna čajna žličica (~1 gram) plodnog, biogenog (biološki živog) tla može sadržati do milijardu bakterija, nekoliko metara gljivičnih hifa, nekoliko tisuća protozoa i mnoštvo nematoda*, a raznolikost mikrobiote (ekološka zajednica *komenzalnih, simbiotičkih i patogenih mikroorganizama*) u tlu nosi ogroman funkcionalni potencijal jer mikroorganizmi u tlu rijetko djeluju samostalno već su pojedine populacije integrirane unutar složenih i specifičnih zajednica koje označavamo kao *mikrobiom tla*. Budući da se u različitim tlima nalaze veoma različite mikrobne zajednice u odnosu prema svim ostalim okruženjima, one su globalno važan rezervoar *bioraznolikosti* koji sadrži između četvrtine i trećine svih živih organi-

zama na Zemlji. Naime, tlo je dinamičan, vrlo heterogen i izuzetno složen sistem čija se čvrsta (~50 %) sastoji od mineralnog (95 %; od čega su ~20 % sekundarni minerali), organskog (~5 %; pretežno koloidi), pora (~50 %) koje popunjavaju voda i zrak (optimalno s ~25 %) i organizama (edafon; ~5 t ha<sup>-1</sup>). S oko 1 500 milijardi tona ugljika u organskoj tvari tla Zemlje, tla su drugo najveće aktivno skladište ugljika nakon oceana (40 000 milijardi tona). Potrebno je naglasiti kako ne postoji (niti je moguć) specifičan indeks biološke raznolikosti, ali važni indikatori su bogatstvo (broj) vrsta (obično označeno "S") i ujednačenost vrste (obično označena s "E").

Disanje tla je tok CO<sub>2</sub> iz tla u atmosferu i čine ga *heterotrofna respiracija živih organizama tla* i *autotrofna respiracija korijena* i drugih podzemnih biljnih organa. *Bruto primarna proizvodnja ugljika (GPP; Gross primary production)* je količina kemijske energije izražena kao ugljična biomasa, a procijenjena je na približno 14,2 Gt C u 2019. god., od čega nakon zadovoljenja energetske potreba fotosintetskih organizama (biljaka i algi) od 85-90 % preostaje NPP (*neto primarna proizvodnja zadržana u biomasi*) što je znatno više od procjene emisije ugljika sagorijevanjem fosilnih goriva od 3,7 Gt C god<sup>-1</sup>. Tlo sadrži oko tri puta više ugljika (1500-2400 Pg C; 1 Pg = 10<sup>15</sup> g) od atmosfere (600-800 Pg C) ili Zemljine vegetacije (450-650 Pg C). Organska tvar tla sadrži ~60 % C te je odlučujući faktor u utjecaju tla na globalni ciklus ugljika jer ~1/5 atmosferskog CO<sub>2</sub> potječe iz tla (~110 Pg C god<sup>-1</sup>) što je oko deset puta više od antropogenih emisija CO<sub>2</sub> (~11 Pg C god<sup>-1</sup>). Oko 1 500 milijardi tona C nalazi se u organskoj tvari svih tala i to je iza oceana (40 000 milijardi tona) drugo po veličini skladište ugljika na Zemlji. U *hidrosferi* (oceani i površinske vode) u vodi otopljen CO<sub>2</sub> se dijelom taloži i gradi sedimentne stijene, a jedan dio koriste autotrofne biljke i alge te njihovim disanjem dospijeva i u atmosferu. Recentna mjerenja pokazuju da se količina kisika u globalnim oceanima smanjila za oko 2 % u posljednjih 50 godina te da su klimatske promjene glavni uzrok ove *deoksigenacije* koja utječe na promjenu cirkulacije kojom se voda bogata kisikom prenosi u dubine oceana, a kisik (O<sub>2</sub>) je idealan parametar za kalibraciju modela koji izračunavaju unos CO<sub>2</sub>, odnosno sekvencijaciju CO<sub>2</sub> u oceanima.

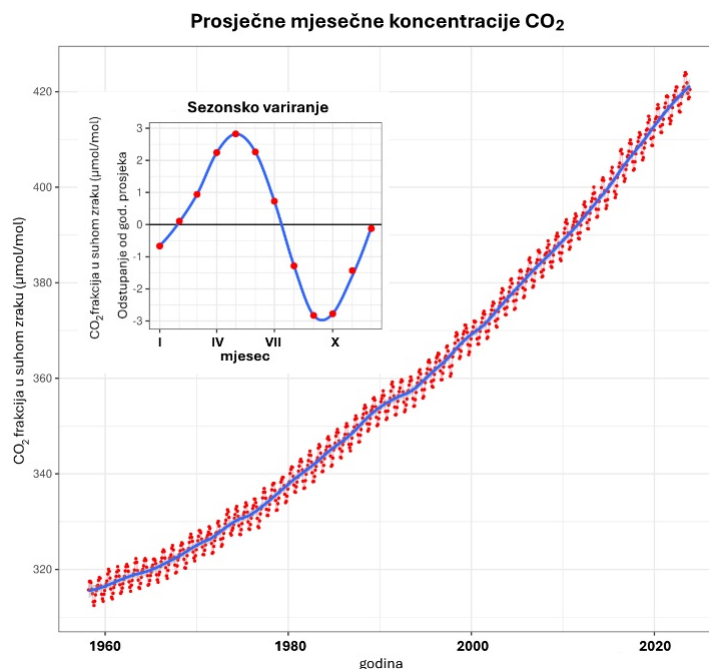
Oceani su golemo skladište energije jer pokrivaju 70 % površine Zemlje i sadrže 97 % vode. Procjenjuje se da su od 1971. - 2010. god. apsorbirali 90 % povećanja energije u svjetskom klimatskom sustavu što je doprinijelo globalnom zatopljenju. Naime, u tom periodu zagrijavanje površine mora iznosilo je prosječno 0,11°C po desetljeću. Također, oceani djeluju kao regulatori ugljika u atmosferi vežući dio CO<sub>2</sub> emitiranog kao rezultat antropogene aktivnosti. Do prije 15-ak godina smatralo se da skladištenje CO<sub>2</sub> nema utjecaj na oceane i organizme koji u njima žive, ali je utvrđeno da otapanje CO<sub>2</sub> u morskoj vodi uzrokuje njezino zakiseljavanje. Oceani igraju važnu ulogu u regulaciji klime Zemlje apsorbirajući i pohranjujući toplinu, te redistribuirajući tu toplinu diljem planeta. Porast temperature oceana uzrokovani klimatskim promjenama ima posljedično niz utjecaja na klimu Zemlje, npr.:

- Topliji oceani se šire, prvenstveno zbog otapanja leda na polarnim kapama, što dovodi do porasta razine mora i plavljenja obalnih područja, oštećenja infrastrukture i egzodusa stanovništva,
- Toplija morska voda apsorbira više vlage iz zraka što povećava količinu oborina u nekim područjima, a smanjenih oborina u drugima uz pojavu suša, poplava i drugih ekstremnih vremenskih događaja,
- Promjena temperature oceana utječe na kretanje morskih struja koje su važne za distribuciji topline diljem planeta što se također odražava na klimatske promjene i
- Ugljični dioksid iz atmosfere se otapa u oceanima što ih čini kiselijima i nepovoljnijom sredinom za mnoge morske organizme.

Budući da oceani imaju ključnu ulogu u globalnom skladištenju ugljika jer sadrže ~50 puta više ugljika od atmosfere, to je posebna i važna tema, ali ipak izvan poljoprivrednog fokusa.

Disanje kopnenih ekosustava veoma važno jer i male promjene intenziteta mogu uzrokovati velike poremećaje u globalnom ciklusu ugljika u relativno kratkom vremenu (Slika 1.). Međutim, disanje tla, pored najvećeg utjecaja na globalno kruženje ugljika u *biosferi*, veoma je značajno i za cikluse hranjivih tvari neophodnih za rast biljaka, koja se oslobađaju u biljkama u pristupačnom obliku (raspoloživom za usvajanje) nakon razgradnje organske tvari u tlu.

[Na intenzitet disanja tla znatno utječe ljudska aktivnost budući da dolazi do promjena različitih faktora u duljem vremenskom periodu.](#) Tijekom industrijskih revolucije posljednjih 200 godina i početka masovne primjene parnih strojeva, ljudi su promijenili način korištenja zemljišta što je utjecalo na brzinu njegovog disanja, a to se odrazilo i na pojavu sve češćih ekstremnih klimatskih prilika kao što su duge i žestoke suše iza kojih slijede dugi i jaki kišni periodi s poplavama i/ili saturacijom tla vodom, što zatim izaziva poremećaje unutar mikrobnih zajednica i velike varijacije u disanju tla. Ljudi su promijenili atmosfersku razinu CO<sub>2</sub> (Slika 1.) utječući na rast biomase i visinu prinosa promjenama intenziteta obrade, povećanjem poljoprivrednih površina i visokim dozama gnojidbe što je potaklo veći intenzitet disanja tla. Na intenzitet disanja tla najviše utječe primjena dušika jer je potreba biljaka, u odnosu na ostale esencijalne elemente ishrane bilja, za njim najveća, a uobičajeno se primjenjuje u više navrata. Budući da se usvajanje mineralnih oblika dušika korijenom odvija se nasuprot gradijenta koncentracije (iz tla s niskom konc. u biljke s mnogo višom konc. N), usvajanje zahtijeva utrošak energije, odnosno pojačano disanje biljaka i/ili mikroorganizama, bez obzira je li potpomognuto [simbiotskim i nesimbiotskim diazotrofima.](#)

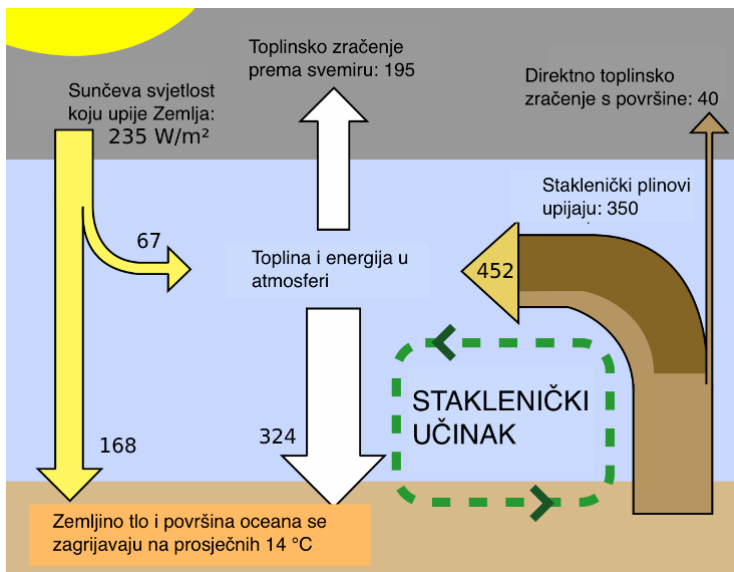


Slika 1. [Povećanje atmosferske razine CO<sub>2</sub> u zadnjih 50 god.](#)

Budući da disanje tla presudno utječe na globalno kruženje ugljika, kao i ciklus mnogih biogenih tvari, važno je razumjeti što se događa s našim tlom i njegovim utjecajem na klimatske promjene. *Klimatsko zagrijavanje* (ili *globalno zatopljenje*) zbog razine CO<sub>2</sub> u atmosferi ima jasan trend porasta kao posljedica efekta [učinka staklenika](#) (Slika 2.), a posljedice su porast temperature [pa je prošla 2023. god. bila najtoplija od početka industrijske revolucije \(porast od 1,5°C\)](#). Klima se mijenjala i u Zemljinoj prošlosti, no smatra se da sadašnje globalno zagrijavanje nastaje zbog povećanih emisija [stakleničkih plinova](#) koji apsorbiraju u donjim dijelovima atmosfere najveći dio Sunčeve energije koja bi se reemitirala s površine Zemlje u svemir. Najveći dio povratnog zračenja apsorbira se u atmosferi ili reflektira natrag prema zemlji molekulama vode (H<sub>2</sub>O, 36-72 %), ugljičnim dioksidom (CO<sub>2</sub>, 9-26 %), metanom (CH<sub>4</sub>, 4-9 %) i ozonom (O<sub>3</sub>, 3-7 %) i u manjoj mjeri nekim drugim plinovima, tako da ni bez stakleničkih plinova u atmosferi temperatura Zemlje bila -73°C.

Sve je više dokaza da se zbog intenzivnog krčenja šuma i degradacije fizikalnih, kemijskih i bioloških svojstava tala, intenziviranjem poljoprivredne proizvodnje i povećanjem poljoprivrednih površina stvaraju uvjeti za ubrzavanje klimatskih promjena. Povijest nas uči da je degradacija tla često bila toliko jaka u prošlosti da se pad čitavih civilizacija (npr. Mezopotamija, Rimsko Carstvo, Maje i dr.), dijelom može pripisati padu produktivnosti tla. [Zapravo, svaka civilizacija predstavlja opasnost za obradivo tlo koje je nezamjenjiv i ograničen resurs, koristan na mnogo načina te suvremeni ljudi moraju biti vrlo oprezni i mudri kako bi izbjegli sličnu sudbinu.](#) Naime, krčenje ili raščišćavanje zemljišta uništava autotrofne procese, a tlo se bez vegetacijskog pokrova mnogo brže zagrijava uzrokujući porast i intenzitet disanja *heterotrofnih bakterija (saprofiti)* koji razgrađuju organsku tvar te tako veći intenzitet disanja tla dovodi do degradacije njegove strukture zbog pada humusa uz jako smanjenje kapaciteta za vodu i zrak te pojave erozivnih procesa, odnosno odnošenja plodnog površinskog sloja vodom ili vjetrom. Većina organske tvari odnesena vodom utječe na pojavu [eutrofikacije \(cvjetanje vode\)](#) jezera, močvara i mora, a nakon raspadanja ogromne biomase vodenih bazena, uglavnom algi, raste emisija CO<sub>2</sub>.

Tlo igra ključnu ulogu u globalnom ciklusu ugljika kroz procese *disanja tla* (oslobađanje, emisija) i *sekvestracije* (vezivanja u organskoj tvari tla). *Sekvestracija C* je izraz koji se koristi za fiksaciju, odnosno dugotrajno zadržavanje atmosferskog ugljika u tlu (npr. sintezom humusa iz biljne mase), ali i vezanjem u ljušturama ili egzoskeletima morskih organizama ili fizičkim procesima (npr. u proizvodnji eko cementa iz Ca i Mg karbonata, izdvajanje CO<sub>2</sub> iz atmosfere za potrebe karbonizacije pića) itd. Biljke apsorbiraju (*asimiliraju*) ugljični dioksid iz atmosfere tijekom fotosinteze, a *nakon završetka vegetativnog ciklusa dio tog ugljika završi humusu koji je samo malim dijelom podložan brzom razlaganju*. Ugljik u humusu se može skladištiti različito dugo, od nekoliko godina do više desetljeća, ovisno o čimbenicima kao što su vrsta tla, temperatura i vlaga. Sve u svemu, tlo služi i kao *ponor*, ali i *potencijalni izvor ugljika*, što ga čini kritičnom komponentom globalnog ciklusa ugljika.



Slika 2. *Prikaz izmjene energije između Sunca i Zemlje kroz atmosferu*

Sve u svemu, tlo služi i kao *ponor*, ali i *potencijalni izvor ugljika*, što ga čini kritičnom komponentom globalnog ciklusa ugljika.

*Disanje korijena* čini otprilike polovicu ukupnog disanja tla, ali ta vrijednost prilično je varijabilna i može se kretati od 10 do 90 % ovisno o vegetaciji nekog ekosustava, biomasi korijena, zemljišnim i vremenskim uvjetima itd.. Korijen se najvećim dijelom nalazi u gornjem, oraničnom sloju tla premda u potrazi za vodom korijen može mnogo dublje prodrijeti u *matični supstrat (C horizont; čvrsta ili klastična stijena, trošina čvrstih stijena ili rastresit, nevezan depozit iz koga je nastalo tlo ili solum, odnosno gornji, biološki aktivi sloj tla)*. Izdvajanje CO<sub>2</sub> korijenom *autotrofnih* (zelenih) biljaka (i *kemoautotrofnih* mikroorganizama) smatra se također disanjem tla, jednako kao i disanje *heterotrofa* koji ne mogu samostalno graditi organsku tvar iz mineralnih spojeva.

Usko područje oko korijena označava se kao *rizosfera* na koju izravno utječu izlučevine korijena i s njim povezani mikroorganizmi poznati kao *mikrobiom korijena*. Korijenski sustav biljaka i tlo koje on prožima, čine jedinstven sustav (*rizosfera*) s jakim uzajamnim utjecajem, mnogo bogatiji mikroorganizmima koje se hrane izlučevinama korijena (*korijenski eksudati, ektoenzimi, fitosiderofore i mucigel*), i odvojenim korijenskim stanicama (tzv. *rizodepozicija*). *Dokazano je da se do 20 % ugljika dobivenog fotosintezom ispušta u tlo kao korijenski eksudati*. Simbioza biljaka i mikroba utječe pozitivno na ciklus hraniva u tlu, potiče rast biljaka, djeluje na suzbijanje bolesti sprječavajući aktivnost patogenih mikroorganizama i sintezom *alelokemikalija utječe na kontrolu susjednih, kao i biljaka iste vrste*, što je uobičajeno u *fitoagrocenozama* (koju sačinjavaju jedinke iste vrste, jednake morfološke građe, starosti, zahtjeva i potreba prema abiotičkim čimbenicima i najčešće su to biljke istog kapaciteta produkcije zbog umjetne selekcije te su prilagođene zajedničkom životu u istovrsnom, posebno prilagođenom i nadziranom okolišu (koji stoga i označavamo kao uzgoj).

Osim CO<sub>2</sub>, tla također imaju značajnu ulogu u ravnoteži drugih stakleničkih plinova. Npr., dušikov oksid (N<sub>2</sub>O) je staklenički plin gotovo 300 puta jači od CO<sub>2</sub>, a povezan je s razgradnjom organske tvari u tlu i primjenom N-gnojiva. Metan (CH<sub>4</sub>) je staklenički plin oko 20 puta jači od CO<sub>2</sub> a proizvodi se u tlima i baruštinama pod anaerobnim uvjetima.