



Labsan s.r.l.
Via campo di fiori 39,
06049 Spoleto (PG)
P.I. 03962430546

Il suolo agricolo come Carbon Sink, effetti di un preparato batterico/fungino per la fissazione della CO₂.

Dott. Sergio Santangelo



IL SUOLO AGRICOLO COME CARBON SINK

Dott. Sergio Santangelo
Laboratori LABSAN, Spoleto, Italy

29/01/2025

ABSTRACT

CO₂Fixator è il nome commerciale dato ad un preparato microbiologico costituito da un mix di ceppi batterici ed uno fungino in rapporti reciproci determinati: *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Nitrobacter*, *Lactobacillus plantarum*, *Thiobacillus denitrificans*, *Methilococcus capsulatus*; una specie fungina: *Trichoderma viride*; detti ceppi metabolizzano il substrato organico terricolo fissando il carbonio al suolo riducendone l'emissione nella sua forma gassosa di CO₂, il *Trichoderma viride* favorisce lo sviluppo di nuove piante. Il presente studio è un passo significativo verso il controllo delle emissioni di gas serra dei suoli agricoli, CO₂Fixator sfrutta la competizione microbica verso i ceppi batterici, già presenti nel substrato terricolo, al fine di evitare l'emissione di gas serra dovuti alla fermentazione dei residui vegetali nel suolo. Non è stata eseguita sterilizzazione del terreno, il presente studio intende valutare l'effetto del CO₂Fixator in condizioni naturali. Questo approccio offre una soluzione biologica per mitigare l'impatto ambientale dell'agricoltura e altre attività umane. La finalità di questo studio è dimostrare che si possono sviluppare pratiche agricole sostenibili: che riducono l'impronta di carbonio dell'agricoltura, che fissino al suolo, oltre che i gas serra, anche i nutrienti come l'azoto limitandone la volatilità, il fosforo, nonché l'aumento della capacità di ritenzione idrica o più in generale la capacità di scambio cationico. Lo studio ha fornito elementi che dimostrano l'aumento della quantità e qualità del suolo. La biodisponibilità di azoto e fosforo, insieme alla capacità del suolo di fornire acqua e all'azione del *Trichoderma viride*, che favorisce la radicazione, consentono di ottenere un suolo di qualità senza l'apporto di sostanze aggiuntive.

Tuttavia, è importante notare l'impoverimento del potassio che dovrebbe essere aggiunto al CO₂Fixator per ottenere il massimo effetto sinergico e supportare il bioaumento. Il CO₂Fixator trasforma il suolo agricolo in un Carbon Sink d'elezione, migliorandone contemporaneamente la qualità. Rispetto ad altre tecniche e sistemi di cattura della CO₂, come la riforestazione, la coltivazione di alghe, la filtrazione dell'aria o la conversione della CO₂ in carburante, CO₂Fixator può essere applicato ovunque ci sia un terreno, sia esso agricolo o meno, inclusi rifiuti organici, fanghi di depurazione e concime organico. Nel caso specifico del suolo agricolo, la digestione batterica comporta il bio-aumento delle componenti del suolo, con conseguente rigenerazione dello stesso e rendendolo progressivamente più fertile trattamento dopo trattamento.

INTRODUZIONE

La rigenerazione del suolo agricolo e la sua trasformazione in un carbon-sink (serbatoio di carbonio) rappresentano una strategia innovativa e sostenibile per contrastare il cambiamento climatico. Questo approccio non solo migliora la fertilità del terreno e la sua capacità di produrre raccolti abbondanti, ma contribuisce anche a ridurre le emissioni di gas serra, migliorando la struttura del terreno e la sua capacità di trattenere nutrienti e acqua. Può essere associato anche all'agricoltura rigenerativa, che include pratiche come l'impiego di colture di copertura, la coltivazione di leguminose e l'agricoltura di conservazione, rivitalizzando i suoli degradati e promuovendo la biodiversità. Queste pratiche rigenerano il terreno e creano anche un ambiente più resiliente agli eventi climatici estremi, migliorando la ritenzione idrica e riducendo la necessità di irrigazione. L'adozione di tali metodi rappresenta un passo fondamentale verso un'agricoltura più ecologica e produttiva, che rispetta l'equilibrio naturale e contribuisce alla lotta contro il riscaldamento globale che sta portando regolarmente ogni anno eventi climatici estremi con enormi costi economici. La questione dell'assorbimento e del rilascio di

CO₂ dai campi coltivati è complessa e multifattoriale. Durante la crescita, le piante assorbono CO₂ attraverso il processo di fotosintesi, che contribuisce a ridurre la quantità in atmosfera. Tuttavia, una volta che le colture sono raccolte, le pratiche agricole comuni come la combustione dei residui di coltura, l'aratura dei residui nel suolo, o la biodigestione possono effettivamente rilasciare una quantità significativa di CO₂ nell'atmosfera con un rapporto di quasi 1:1, sostanzialmente un pareggio tra CO₂ assorbita e CO₂ riemessa.

“Questo ciclo di assorbimento e rilascio di carbonio è un aspetto critico nella gestione sostenibile delle terre agricole come carbon-sink”.

La ricerca attuale esplora metodi alternativi per gestire sia i residui di coltura in modo che il carbonio catturato dalle piante non venga rilasciato nuovamente nell'atmosfera sia i residui di origine animale (es. letame) od umana (es. fanghi di depurazione). Un esempio di tale approccio è il "bioenergy with carbon capture and storage" (BECCS), che prevede la coltivazione di piante, la loro raccolta e successiva combustione per produrre energia, con la cattura e lo stoccaggio del CO₂ prodotto durante la combustione. Altri metodi includono l'incremento del carbonio nel suolo attraverso pratiche agricole che migliorano la salute del suolo e aumentano la sua capacità di sequestrare carbonio come: l'agricoltura conservativa e l'uso di colture di copertura. L'obiettivo è sviluppare sistemi agricoli che evitino di rilasciare CO₂ e che possano anche agire come serbatoi di carbonio (carbon-sink), contribuendo così alla mitigazione dei cambiamenti climatici. Questo richiede un cambiamento nelle pratiche agricole tradizionali e l'adozione di tecnologie innovative, come il CO₂Fixator, che possono essere scalate. La sfida è trovare un equilibrio tra la produzione alimentare, la conservazione dell'ambiente e la riduzione dell'impatto climatico dell'agricoltura. CO₂Fixator, oggetto di questo studio, presenta un approccio che evita il rilascio di CO₂ ed altri gas inquinanti (misurabili come CO₂ equivalenti) ed assicura

lo sviluppo di pratiche agricole più semplici e più sostenibili. Il settore agricolo ha molti margini di innovazione culturale e di guadagno: l'uso degli scarti agricoli come fertilizzante e la generazione di crediti di carbonio rappresentano un'opportunità significativa. Questa pratica non solo riduce la necessità di fertilizzanti chimici (di fatto è già una riduzione a monte del quantitativo di CO₂ emessa dalle aziende estrattive) ma contribuisce anche alla riduzione dell'impronta di carbonio dell'agricoltura stessa. In Italia, come nel resto d'Europa, il lavoro relativo alla definizione dei crediti di carbonio e della relativa banca che li gestirà sul mercato è già a buon punto. Le aziende agricole, attraverso l'adozione di pratiche agronomiche sostenibili, possono diventare produttrici di crediti di carbonio, beneficiando economicamente e contribuendo positivamente al clima. Ad esempio, un agricoltore che passa dall'aratura tradizionale allo strip tiller o al sodo, che adotta sistemi di interrimento o di iniezione dei liquami e digestati, che utilizza le mappe di prescrizione per razionalizzare l'uso della concimazione minerale e dei diserbanti, può vedersi assegnare un certo numero di crediti di carbonio da mettere sul mercato a un determinato prezzo. Il CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria) è coinvolto nello sviluppo dei modelli che quantificano l'anidride carbonica sequestrata da ogni attività colturale, nelle varie condizioni ambientali, e nella certificazione delle azioni virtuose degli agricoltori. Questo processo di quantificazione e certificazione è fondamentale per la creazione di un mercato dei crediti di carbonio affidabile e trasparente. Inoltre, è stato istituito il Registro pubblico dei crediti di carbonio generati su base volontaria dal settore agroforestale nazionale, che ha l'obiettivo di valorizzare le pratiche di gestione agricole e forestali sostenibili. Questo registro permette agli agricoltori di iscrivere i crediti di carbonio generati e di partecipare a un mercato volontario nazionale, in coerenza con le disposizioni relative al Registro nazionale dei serbatoi di carbonio agro-forestali. L'uso degli scarti agricoli come fertilizzante e la generazione di crediti di carbonio sono esempi

concreti di come l'agricoltura può evolversi verso un modello più sostenibile e redditizio. Queste pratiche non solo aiutano a ridurre l'uso di risorse non rinnovabili e a mitigare il cambiamento climatico, ma offrono anche nuove opportunità economiche per gli agricoltori che si impegnano in percorsi di sostenibilità ambientale. Ancora più importante è la possibilità che ogni Paese si renda Carbon Neutral in un processo virtuoso dove: chi emette CO₂ ha la possibilità di compensare accedendo a progetti GHG carbon-sink attuati nel suo stesso Paese. Inquinati qui, compensati qui!

MATERIALI E METODI

La sperimentazione di CO₂Fixator è un processo che implica la misurazione accurata dei livelli di anidride carbonica rilasciati dopo l'interramento dei residui di raccolta. Utilizzando camere chiuse, si crea un ambiente controllato per monitorare le emissioni. Queste camere, realizzate con contenitori di plastica capovolti, sono sigillate al suolo per catturare i gas emessi dai residui colturali interrati e in decomposizione. Alle camere sono stati applicati fori per consentire lo scambio gassoso con l'esterno. I sensori di gas CO₂ "SCD30" all'interno delle camere registrano le concentrazioni di gas nel tempo, fornendo dati preziosi sulla dinamica delle emissioni e sull'efficacia di CO₂Fixator nell'attenuare l'impatto ambientale. La calibrazione dei sensori è stata impostata per rilevare concentrazioni di gas, espresse in ppm (parti per milione), da un minimo di 10ppm in su, senza limite, ciò assicura che i dati raccolti siano accurati e affidabili. IL sensore SCD30 consente di rilevare anche i parametri di temperatura e umidità, utili alla calibrazione del sensore stesso ed alla lettura della presenza di gas CO₂. L'esperimento è stato condotto in duplice sia in campo agricolo sia in laboratorio. In laboratorio, le prove sono state eseguite in capsule forate a temperatura e umidità costanti. Il suolo, sia per le prove in campo che per le prove in laboratorio, è stato preparato in modo da ottenere su tutti i

campioni una composizione di 5:1 tra materia inorganica e materia organica secca, corrispondenti a circa 27,778 tonnellate di sostanza organica secca su un ettaro e circa 100g in contenitore in laboratorio. Le analisi di laboratorio sono fondamentali per comprendere l'impatto della sperimentazione sul suolo. Attraverso queste analisi, è possibile determinare: la quantità di sostanza organica e se l'introduzione di CO₂Fixator nel terreno possa migliorare la disponibilità di nutrienti essenziali come l'azoto e il fosforo, che sono vitali per la crescita delle piante. Inoltre, la capacità del terreno di trattenere l'acqua è un altro indicatore importante della salute del suolo, poiché influisce direttamente sulla resistenza delle piante in condizioni di siccità. Monitorando questi parametri si otterranno dati sull'efficacia della tecnica di bio-aumento e sulla loro sostenibilità a lungo termine.

RISULTATI

Analisi del terreno ad inizio sperimentazione:
Stato iniziale

Descrizione prova	Valore	U.M.	U	L Q	Metodo
pH	6,9	unità di pH			DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met III.1
Fosforo assimilabile	451	mg/Kg di P ₂ O ₅			DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met XV.3
Potassio scambiabile *	393	mg/Kg			MEP-S-05 rev. 0 del 22/04/2013
Carbonato di Calcio	32	g/Kg di CaCO ₃			DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met V.2
Calcare totale*	76	g/Kg di CaCO ₃			D.M. 13/09/99 SO n° 185 GU n° 248 21/10/1999 Met. V.1
Carbonio organico	138	g/Kg			DM 13/09/1999 SO n°185 GU n° 248 21/10/1999 Met.VII 3
Sostanza organica	238	g/Kg			DM25/03/2002 GU n° 84 10/04/2002 U n°84
Capacità di scambio cationico*	9,5	meq/100g			DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met XIII.2 DM 25/03/2002 GU n° 84 10/04/2002
Azoto totale	10,7	g/Kg	± 0,7		DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met XIV.2 + XIV.3 + DM 25/03/2002 GU n 84 10/04/2002

LQ: Limite di Quantificazione – UM: Unità di Misura– U: Incertezza

Analisi del terreno a fine sperimentazione:
Controllo non trattato con CO2Fixator

Descrizione prova	Valore	U.M.	U	LQ	Metodo
pH	7,1	unità di pH			DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met III.1
Fosforo assimilabile	808	mg/Kg di P2O5		5	DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met XV.3
Potassio scambiabile *	491	mg/Kg		40	MEP-S-05 rev. 0 del 22/04/2013
Carbonato di Calcio	39	g/Kg di CaCO3			DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met V.2
Calcare totale*	83	g/Kg di CaCO3			D.M. 13/09/99 SO n° 185 GU n° 248 21/10/1999 Met. V.1
Carbonio organico	122,8	g/Kg			DM 13/09/1999 SO n°185 GU n° 248 21/10/1999 Met.VII 3
Sostanza organica	222,2	g/Kg			DM25/03/2002G U n°84 10/04/2002
Capacita' di scambio cationico*	8,4	meq/100g			DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met XIII.2 DM 25/03/2002 GU n° 84 10/04/2002
Azoto totale	11,8	g/Kg	± 0,7		DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met XIV.2 + XIV.3 + DM 25/03/2002 GU n 84 10/04/2002

LQ: Limite di Quantificazione – UM: Unità di Misura – U: Incertezza

Analisi del terreno a fine sperimentazione:
Campione trattato con CO2Fixator

Descrizione prova	Valore	U.M.	U	L	Q	Metodo
pH	7,7	unità di pH				DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met III.1
Fosforo assimilabile	783	mg/Kg di P2O5		5		DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met XV.3
Potassio scambiabile *	114	mg/Kg		40		MEP-S-05 rev. 0 del 22/04/2013
Carbonato di Calcio	44	g/Kg di CaCO3				DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met V.2
Calcare totale*	111	g/Kg di CaCO3				D.M. 13/09/99 SO n° 185 GU n° 248 21/10/1999 Met. V.1
Carbonio organico	140,6	g/Kg				DM 13/09/1999 SO n°185 GU n° 248 21/10/1999 Met.VII 3
Sostanza organica	244,4	g/Kg				
Capacita' di scambio cationico*	9,9	meq/100g				DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met XIII.2
Azoto totale	12,2	g/Kg	± 0,7			DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met XIV.2 + XIV.3

LQ: Limite di Quantificazione – UM: Unità di Misura – U: Incertezza

Tabella 1. Emissioni rilevate in campo:

Numero di Misurazioni Medie	CONTROLLO (ppm)Non trattato con CO2Fixator	CAMPIONE 1 ppm CO2Fixator	CAMPIONE 2 ppm CO2Fixator	CAMPIONE3 ppm CO2Fixator
1	545,65	31,83	70,47	20,13
2	329,86	28,15	102,53	17,49
3	651,54	31,09	105,38	31,09
4	1682,4	29,96	113,19	83,51
5	451,4	37,03	117,21	21,1
6	408,05	29,87	108,78	23,76
7	1230,02	31,55	112,85	70,7
8	1444,9	31,36	112,18	73,27
9	349,51	29,83	112,68	17,37
10	354,28	30,24	114,22	12,43
11	5892,06	43,81	142,08	215,45
12	860,79	35,42	116,18	28,63
13	630,33	28,83	108,88	24,32
14	2157,55	50,03	134,13	97,23
15	862,17	31,31	114,02	36,58
16	718,34	29,81	114,54	23,81
17	762,38	27,35	115,58	25,82
18	645,06	28,86	109	28,86
19	964,17	30,01	111,3	30,01
20	444,32	28,94	111,21	17,03
21	1142,24	34,32	116,65	39,91
22	703,57	34,63	123,95	26,35
23	293,49	30,22	112,07	10,92
24	605,16	27,37	113,31	17,98
25	337,03	30,38	112,65	14,64
26	1154,07	30,17	111,87	49,7
27	568,28	29,07	113,86	20,49
28	3005,85	32,42	113,95	118,09
29	379,56	27,1	106,12	14,76
30	846,26	29,12	111,92	24,65
31	922,94	31,12	123,91	36,46
32	934,88	26,07	107,91	35,88
33	343,86	24,9	101,47	12,32
34	238,07	29,89	117,07	12,29
35	2310,83	28,19	116,7	86,4
36	1344,86	31,42	112,36	56,68
37	454,15	29,39	115,09	22,02
38	1023,67	27,98	107,74	38,52
39	5848,64	41,16	128,99	270,31
40	1624,96	37,03	128,19	79,25
41	1034,56	38,6	127,08	44,66
42	747,81	40,51	135,9	38,56
43	434,89	48,96	205,13	23,74
44	489,3	51,19	244	28,1
45	393,37	51,15	236,96	25,1
46	444,13	51,1	243,57	28,05
47	797,01	51,35	244,77	44,66
48	831,15	49,08	238,04	44,69
49	6424	61,31	251,88	375,71
50	2453,33	56,26	238,29	145,69
51	900,86	49,05	224,52	56,17
52	479,76	46,85	211,85	31,44
53	639,28	43,19	202,28	37,23
54	541,78	44,93	194,62	29,95
55	541,03	44,87	188,5	29,91

Tabella 2. Emissioni rilevate in laboratorio

Misurazioni medie	Controllo	Campione 1	Campione 2	Campione 3
1	567,15	23,74	34,07	24,77
2	597,99	23,74	34,07	28,02
3	537,56	23,74	34,07	22,75
4	490,91	23,74	34,07	20,85
5	518,51	22,75	34,07	22,75
6	499,98	22,75	34,07	21,79
7	455,88	22,75	34,07	19,94
8	406,96	22,75	32,8	18,21
9	430,89	22,75	34,07	19,06
10	391,58	22,75	34,07	16,58
11	1418,31	21,79	32,8	67,54
12	455,88	22,75	32,8	22,75
13	414,82	21,79	32,8	20,85
14	384,05	21,79	32,8	19,94
15	255,22	21,79	32,8	12,95
16	490,91	20,85	32,8	19,94
17	384,05	20,85	32,8	17,38
18	223,82	20,85	32,8	11,05
19	686,63	21,79	31,55	44
20	1862,48	21,79	32,8	83,34
21	1418,31	21,79	32,8	67,54
22	384,05	30,34	39,53	19,06
23	327,74	26,9	36,73	16,58
24	308,32	26,9	36,73	16,58
25	289,78	25,82	35,39	15,8
26	233,95	23,74	34,07	12,95

27	260,75	24,77	35,39	12,29
28	1259,32	22,75	34,07	59,54
29	587,57	29,16	45,57	28,02
30	406,96	29,16	47,17	19,06
31	430,89	28,02	47,17	22,75
32	327,74	26,9	36,73	16,58
33	641,12	52,22	40,98	31,55
34	228,84	30,34	47,17	12,29
35	218,88	29,16	47,17	11,05
36	209,25	29,16	47,17	10,47
37	295,87	28,02	47,17	17,38
38	1081,16	28,02	45,57	40,98
39	675,02	29,16	47,17	28,02
40	557,15	29,16	45,57	24,77
41	490,91	29,16	45,57	22,75
42	447,43	28,02	45,57	19,94
43	473,14	28,02	45,57	22,75
44	1185,42	28,02	45,57	53,99
45	341,19	29,16	47,17	16,58
46	289,78	28,02	47,17	14,33
47	283,79	26,9	45,57	14,33
48	327,74	26,9	45,57	20,85
49	289,78	26,9	47,17	13,63
50	430,89	26,9	47,17	21,79
51	1639,69	26,9	45,57	47,17
52	308,32	26,9	40,98	19,06
53	348,07	25,82	40,98	19,06
54	177,97	25,82	42,47	8,83
55	266,37	29,16	44	15,05

Tabella 3. Percentuali guadagno/perdita:

Valore	Controllo	Campione
Fosforo	+79%	+74%
Potassio	+24%	-71%
Carbonato di calcio	+22%	+37,5%
Calcare totale	+9%	+46%
Carbonio Organico	-6,7%	+2%
Sostanza organica	-6,7%	+2,5%
Capacità scambio cationico	-12%	+4%
Azoto	+10%	+14%

Fig.1 Emissioni misurate in campo (medie su 24000 misurazioni) ppm

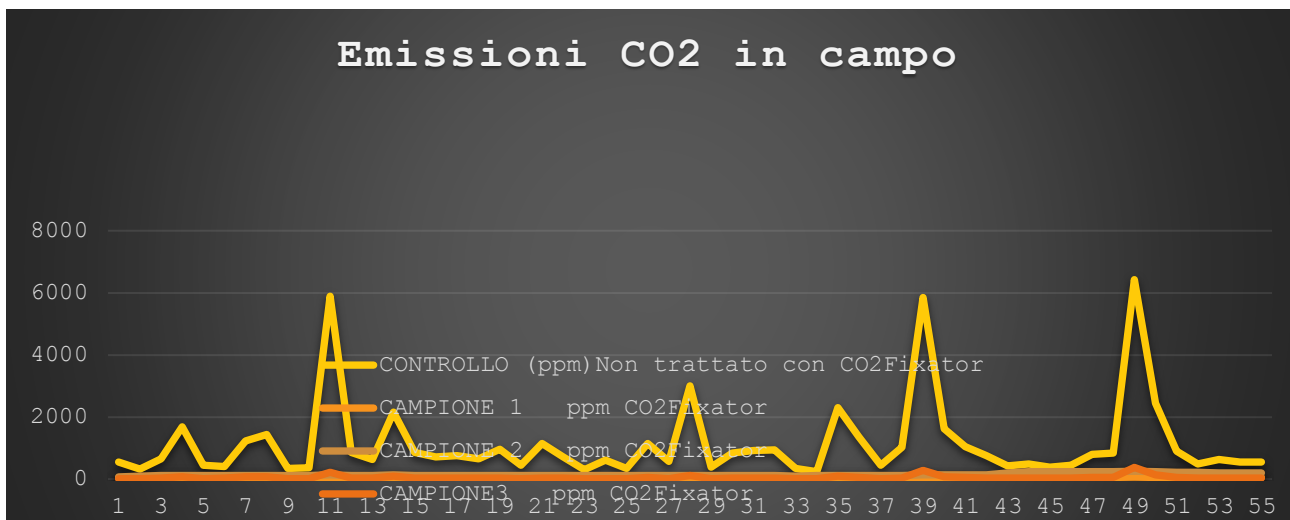


Fig.2 Emissioni misurate in laboratorio (medie su 24000 misurazioni) ppm

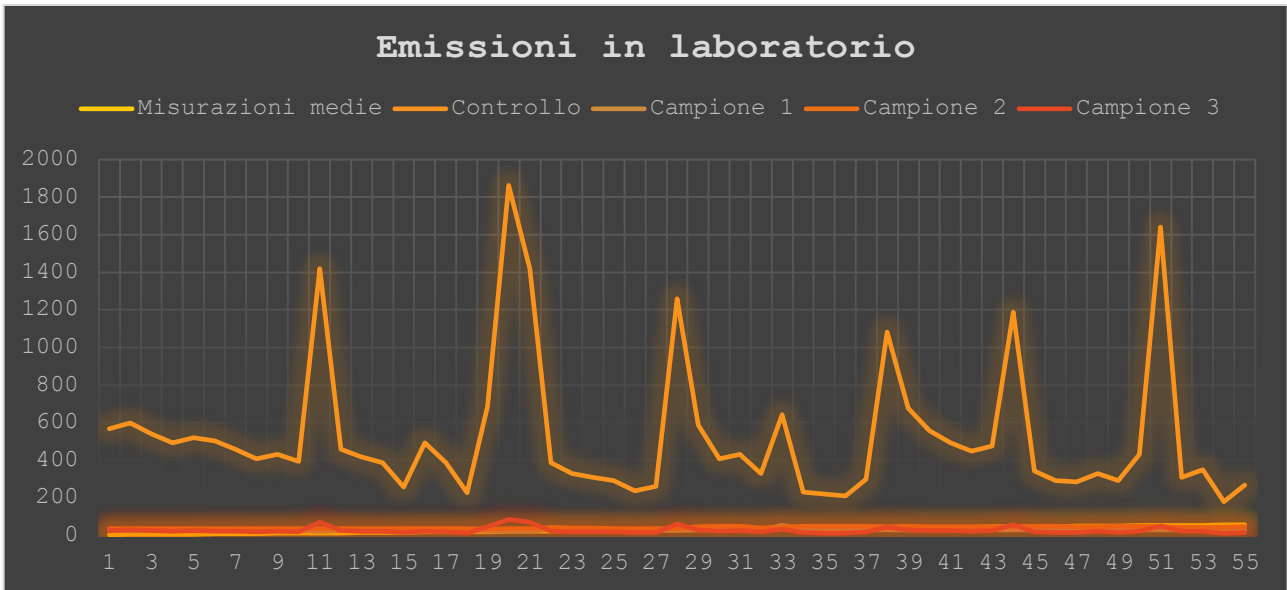
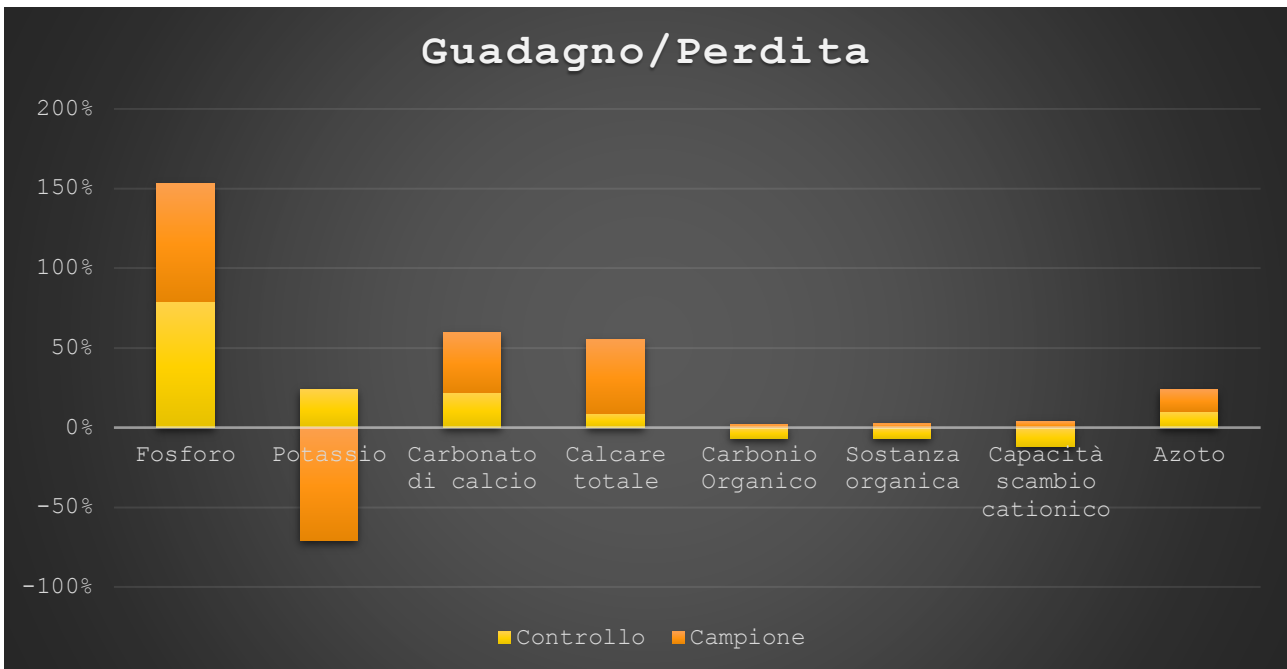


Fig.3 Guadagno/perdita del controllo e dei campioni rispetto allo stato iniziale



DISCUSSIONE

Per facilitare il confronto tra i risultati del campione iniziale e il campione di controllo, si evidenzia come la sostanza organica venga metabolizzata dai batteri normalmente presenti nel terreno, risultando in CO₂ come catabolita. L'elemento di maggiore interesse di questo studio è il carbonio organico, una componente della sostanza organica del suolo costituita essenzialmente dal carbonio presente nei composti organici, include carbonio in molecole come carboidrati, proteine, lipidi e acidi nucleici. Questi residui subiscono processi di decomposizione, fermentazione e trasformazione operati dagli organismi viventi presenti nel suolo. La diminuzione della componente organica nel campione di controllo suggerisce chiaramente che tale sostanza è stata metabolizzata dalla componente batterica del suolo con la produzione di CO₂ come catabolita. Al contrario, sia il campione in campo sia il campione in laboratorio trattati con il CO₂Fixator mostrano un incremento della componente di carbonio organico. I dati ottenuti tramite il sensore specifico per la CO₂ "SCD30" indicano chiaramente che la concentrazione di CO₂ (espressa in ppm, parti per milione) nel campione di controllo (arancione) è superiore rispetto a quella dei campioni trattati. Si osserva che, mentre il campione di controllo emette CO₂ in modo discontinuo ed in elevate quantità rispetto ai campioni trattati che emettono CO₂ in modo continuo e in quantità significativamente inferiore. Tuttavia, la rilevazione della CO₂ mediante sensore può fornire solo un dato qualitativo, poiché il gas tende ad accumularsi sotto i contenitori. Nel grafico dei guadagni/perdite di sostanze espressi in percentuale rispetto allo stato iniziale, il controllo è in giallo, il campione è in arancio. Il carbonio organico aumenta notevolmente nei campioni trattati con il CO₂Fixator. Si è osservato lo sviluppo di nuove piantine nel controllo e nel campione, nel controllo lo sviluppo di nuove piantine non ha influito sulla compensazione delle emissioni di CO₂ del suolo, indicando che la velocità di decomposizione della componente organica

del suolo supera l'attività di fissazione della CO₂ da parte della nuova sostanza organica. Al contrario nel campione trattato lo sviluppo di nuove piantine aggiunge e fissa altra CO₂. I dati di laboratorio ci forniscono indicazioni chiare degli effetti del CO₂Fixator anche in altri aspetti. Si registra nel campione trattato un aumento della capacità di scambio cationico che permette di trattenere nutrienti essenziali che possono essere rilasciati alle piante quando necessario, è indice, inoltre, di una maggior struttura del suolo con capacità di ritenzione idrica, mentre nel campione non trattato si evince una riduzione dello stesso rispetto al campione dello stato iniziale. Lo stesso si può dire della componente del calcare totale che ha influito sul pH, basificando il suolo, e di azoto totale. Il processo di decomposizione ha apportato fosforo nei campioni di controllo e trattati, si nota che il potassio nel controllo è leggermente aumentato mentre nel campione trattato è drasticamente diminuito, ciò è dovuto allo sviluppo delle nuove piantine che risultano essere qualitativamente superiori alle piantine cresciute nel campione di controllo.

CONCLUSIONI

Il CO₂Fixator è un prodotto innovativo composto da un mix di batteri e dal fungo *Trichoderma viride*, progettato per fissare la CO₂ al suolo e migliorare la qualità del terreno. La tecnologia alla base del CO₂Fixator sfrutta l'effetto sinergico tra i batteri e il fungo *Trichoderma viride*. Questo effetto sinergico permette di fissare la CO₂ al suolo, contribuendo alla ricostruzione del terreno. Ogni batterio del CO₂Fixator ha specifiche capacità metaboliche, aggredendo solo il substrato che gli fornisce nutrienti e rilasciando nell'ambiente circostante molecole che hanno un uso antibiotico, impedendo ad altri batteri di replicarsi e diffondersi favorendo la crescita delle piante. Sebbene il *Bacillus subtilis* e il *Bacillus licheniformis* producano CO₂ come sottoprodotto del loro metabolismo, la quantità di anidride carbonica emessa è significativamente inferiore rispetto a quella prodotta dai batteri normalmente presenti nel suolo. La presenza di altri microrganismi nel CO₂Fixator garantisce che il

substrato venga digerito e metabolizzato in componenti semplici, pronti per l'uso, favorendo il nutrimento reciproco. Gli altri batteri nel CO₂Fixator producono CO₂ solo come sottoprodotto secondario e solo in particolari condizioni fisico-chimiche. L'azione sinergica del CO₂Fixator favorisce la ricostruzione del suolo impedendone l'erosione, la ritenzione idrica previene il dilavamento del suolo e la perdita di sali minerali e matrice organica, all'aumento del volume del suolo corrisponde un aumento della fertilità dello stesso. Il Trichoderma viride regola i processi vegetativi della pianta, armonizzando l'assorbimento dei nutrienti dopo l'azione di compostaggio del mix batterico. L'efficacia del preparato dimostra che il suo utilizzo potrebbe non limitarsi alla digestione della sostanza organica del suolo, ma estendersi anche ad altri tipi di sostanze organiche come letame o fanghi di depurazione. Quantità e qualità potrebbero essere oggetto di ulteriori studi. La maggiore presenza di sostanza organica nei campioni trattati è dovuta a una serie di fattori che, insieme, costituiscono un pool sinergico. Questo pool non solo riduce le emissioni di CO₂, ma favorisce anche lo sviluppo di ulteriori piante che assorbono altra CO₂, rendendo il suolo un Carbon Sink ideale. Lo studio ha fornito ulteriori elementi riferiti al miglioramento della qualità del suolo, rendendo la pratica agricola più sostenibile. Oltre all'aumento della componente organica e inorganica, con conseguente incremento del volume del suolo, si osserva anche un miglioramento della capacità di ritenzione idrica. La biodisponibilità di azoto e fosforo, insieme alla capacità del suolo di fornire acqua e all'azione del Trichoderma viride, che favorisce la radicazione, consentono di ottenere un suolo di qualità senza l'apporto di sostanze aggiuntive. Tuttavia, è importante notare l'impovertimento del potassio che dovrebbe essere aggiunto al mix per ottenere il massimo effetto sinergico e supportare il bioaumento. Il CO₂Fixator trasforma il suolo agricolo in un Carbon Sink d'elezione, migliorandone contemporaneamente la qualità.

La quantità di CO₂ fissata al suolo equivalente alla quantità di carbonio organico è data dal rapporto tra la massa molecolare della CO₂ e la massa molecolare del Carbonio

$$\frac{44 \text{ g/mol (CO}_2\text{)}}{12 \text{ g/mol (C)}} = 3,66$$

1 tonnellata di carbonio fissato equivale a 3,66 tonnellate di CO₂ atmosferica.

Ad esempio:

- la biomassa residua di mais su un ettaro varia tra 5 e 15 tonnellate di sostanza secca, si fisserebbero tra 18,3 e 54,9 tonnellate di CO₂;
- la biomassa residua di grano su un ettaro varia tra 3 e 8 tonnellate di sostanza secca, si fisserebbero tra 10,98 e 29,28 tonnellate di CO₂;
- la biomassa residua di riso su un ettaro varia tra 3 e 7 tonnellate di sostanza secca, si fisserebbero tra 10,98 e 25,62 tonnellate di CO₂;
- Il contenuto di carbonio in una tonnellata di letame varia tra il 150 e 300Kg, si fisserebbero tra 0,549 – 1,098 tonnellate di CO₂;
- Il contenuto di carbonio in una tonnellata di sostanza secca derivata dai fanghi di depurazione varia tra 250 – 350Kg, si fisserebbero tra 0,915 – 1,281Kg.

In conclusione, rispetto ad altre tecniche e sistemi di cattura della CO₂, come la riforestazione, la coltivazione di alghe, la filtrazione dell'aria o la conversione della CO₂ in carburante, il CO₂Fixator può essere applicato ovunque ci sia un terreno, sia esso agricolo o meno, inclusi rifiuti organici, fanghi di depurazione e concime organico. Nel caso specifico del suolo agricolo, la digestione batterica comporta il bioaumento delle componenti del suolo, con conseguente rigenerazione dello stesso e rendendolo progressivamente più fertile trattamento dopo trattamento. La superficie agricola totale (SAT) in Italia ammonta a circa 26,2 milioni di ettari, comprendendo tutte le terre destinate a

coltivazioni, pascoli, prati permanenti e altre superfici agricole. Ipotizzando una fissazione media di 15 tonnellate di CO₂ per ettaro, si ottiene un totale di 393 milioni di tonnellate di CO₂ fissate ogni anno. Nel 2021, le emissioni totali di gas serra in Italia, espresse in CO₂ equivalente, sono state di circa 418 milioni di tonnellate. L'adozione diffusa di CO₂Fixator potrebbe contribuire a compensare il 94% delle emissioni totali dell'Italia.

BIBLIOGRAFIA

- [Bacillus subtilis impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde](#)
S Mahapatra, R Yadav... - Journal of applied ..., 2022 - academic.oup.com
- [Characteristics and antimicrobial activity of Bacillus subtilis strains isolated from soil](#)
S Todorova, L Kozuharova - World Journal of Microbiology and ..., 2010 - Springer
- [The Bacillus subtilis genome sequence: the molecular blueprint of a soil bacterium](#)
A Wipat, CR Harwood - FEMS Microbiology Ecology, 1999 - academic.oup.com
- [Application of biofertilizer containing Bacillus subtilis reduced the nitrogen loss in agricultural soil](#)
BO Sun, L Gu, L Bao, S Zhang, Y Wei, Z Bai... - Soil Biology and ..., 2020 - Elsevier
- [Effects of Bacillus subtilis and Pseudomonas fluorescens as the soil amendment](#)
CWW Ng, WH Yan, KWK Tsim, P San So, YT Xia... - Heliyon, 2022 - cell.com
- [Initial adhesion of Bacillus subtilis on soil minerals as related to their surface properties](#)
Z Hong, X Rong, P Cai, K Dai, W Liang... - ... Journal of Soil ..., 2012 - Wiley Online Library
- [Bacillus subtilis biofilm development in the presence of soil clay minerals and iron oxides](#)
W Ma, D Peng, SL Walker, B Cao, CH Gao... - npj Biofilms and ..., 2017 - nature.com
- [Bacillus subtilis biofertilizer mitigating agricultural ammonia emission and shifting soil nitrogen cycling microbiomes](#)
B Sun, Z Bai, L Bao, L Xue, S Zhang, Y Wei... - Environment ..., 2020 - Elsevier
- [Biochar combined with Bacillus subtilis SL-44 as an eco-friendly strategy to improve soil fertility, reduce Fusarium wilt, and promote radish growth](#)
W Chen, Z Wu, C Liu, Z Zhang, X Liu - Ecotoxicology and Environmental ..., 2023 - Elsevier
- [Bacillus subtilis and surfactant amendments for the breakdown of soil water repellency in a sandy soil](#)
MA Lowe, F Mathes, MH Loke, G McGrath, DV Murphy... - Geoderma, 2019 - Elsevier
- [Production of levan by Bacillus licheniformis for use as a soil sealant in earthen manure storage structures](#)
AE Ghaly, F Arab, NS Mahmoud... - Am. J. Biochem ..., 2007 - researchgate.net
- [Calcium carbonate precipitation by strain Bacillus licheniformis AK01, newly isolated from loamy soil: a promising alternative for sealing cement-based materials](#)
A Vahabi, AA Ramezani-pour... - Journal of basic ..., 2015 - Wiley Online Library
- [Bacillus licheniformis YB06: A Rhizosphere-Genome-Wide Analysis and Plant Growth-Promoting Analysis of a Plant Growth-Promoting Rhizobacterium ...](#)
S Ni, Y Wu, N Zhu, F Leng, Y Wang - Microorganisms, 2024 - mdpi.com
- [Bacillus licheniformis NCIM 2536](#)
PA Gulhane, AV Gomashe, S Lade - Int. J. Curr. Microbiol. 4pp. Sci, 2014 - sscnagpur.ac.in
- [Anaerobic metabolism in Bacillus licheniformis NCIB 6346](#)
P Shariat, WJ Mitchell, A Boyd, FG Priest - Microbiology, 1995 - microbiologyresearch.org
- [Bacillus licheniformis inoculation promoted humification process for kitchen waste composting: Organic components transformation and bacterial metabolic ...](#)
Y Chang, K Zhou, T Yang, X Zhao, R Li, J Li, S Xu... - Environmental ..., 2023 - Elsevier
- [Enhanced organic degradation and microbial community cooperation by inoculating Bacillus licheniformis in low temperature composting](#)
J Su, K Zhou, W Chen, S Xu, Z Feng, Y Chang... - Journal of ..., 2024 - Elsevier
- [Comparative growth analysis of the facultative anaerobes Bacillus subtilis, Bacillus licheniformis, and Escherichia coli](#)
LD Clements, BS Miller, UN Streips - Systematic and applied microbiology, 2002 - Elsevier
- [Activity, size and structure of a Nitrobacter community as affected by organic carbon and nitrite in sterile soil](#)
V Degrange, R Lensi, R Bardin - FEMS Microbiology Ecology, 1997 - academic.oup.com
- [Soil CO₂ emission partitioning, bacterial community profile and gene expression of Nitrosomonas spp. and Nitrobacter spp. of a sandy soil amended with biochar and ...](#)
G Sorrenti, G Burianni, F Gaggia, L Baffoni, F Spinelli... - Applied Soil ..., 2017 - Elsevier
- [Biochar application affects Nitrobacter rather than Nitrospira in plastic greenhouse vegetable soil](#)
XF Wang, J Li, G Li, GL Zhang, ZW Wang, YC Zhi... - Applied Soil ..., 2022 - Elsevier
- [Biochemistry of nitrification in soil](#)
JH Quastel, PG Scholefield - Bacteriological Reviews, 1951 - Am Soc Microbiol
- [Nitrification and nitrifiers in acidic soils](#)
Y Li, SJ Chapman, GW Nicol, H Yao - Soil Biology and Biochemistry, 2018 - Elsevier
- [Soil properties and silage quality in response to oat and pea seeding ratios and harvest stage on the Qinghai-Tibetan Plateau](#)
W Liu, L Zhao, Y Chen, Y Shen, Z Luo... - ... in Sustainable Food ..., 2023 - frontiersin.org
- [Effect of Lactobacillus plantarum on germination and growth of tomato seedlings](#)
N Limanska, T Ivanytsia, O Basiul, K Krylova... - ... physiologiae plantarum, 2013 - Springer
- [Potential of Lactobacillus agilis, Lactobacillus plantarum, and Lactobacillus acidophilus to enhance wheat growth under drought and heat stress](#)
AN Khan, MN Hassan, R Keyvani, HZ Amir... - Journal of King Saud ..., 2024 - Elsevier
- [Effects of Distiller's Grains Biochar and Lactobacillus plantarum on the Remediation of Cd-Pb-Zn-Contaminated Soil and Growth of Sorghum-Sudangrass](#)
G Zhu, Y Li, D Cheng, R Chen, Y Wang, Q Tu - Microorganisms, 2024 - mdpi.com
- [The Effects of Lactobacillus plantarum, Bacillus subtilis, a Lignocellulolytic Enzyme System, and Their Combination on the Fermentation Profiles, Chemical ...](#)
J Su, Y Xue, K Zhang, Z Liu, J Lv, Q Yang, Z Li, C Liu... - Animals, 2024 - mdpi.com
- [Physiology and kinetics of autotrophic denitrification by Thiobacillus denitrificans](#)
G Claus, HJ Kutzner - Applied Microbiology and Biotechnology, 1985 - Springer
- [Oxidation of hydrogen sulfide by Thiobacillus denitrificans: Desulfurization of natural gas](#)
KL Sublette, ND Sylvester - Biotechnology and Bioengineering, 1987 - Wiley Online Library
- [Studies on Thiobacillus denitrificans](#)
K Baalsrud, KS Baalsrud - Archiv für Mikrobiologie, 1954 - Springer
- [Nitrates removal from wastewater using bacteria Thiobacillus denitrificans](#)
Z Blažková - dk.upce.cz
- [Sulfur in agriculture](#)

[AR Lucheta, MR Lambais](#) - *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012 - SciELO Brasil
[Bacterial Communities Associated with the Oxidation of Elemental Sulfur in Calcareous Soils of Oman](#)
M Al-Amri, Y Souissi, D Menezes-Blackburn... - ... *Soil Science and Plant ...*, 2024 - Springer
[MICROORGANISMS CONCERNED IN THE OXIDATION OF SULFUR IN THE SOIL I. INTRODUCTORY](#)
SA Waksman - *Journal of Bacteriology*, 1922 - Am Soc Microbiol
[Soil microbial activities and carbon and nitrogen fixation](#)
G Chen, H Zhu, Y Zhang - *Research in microbiology*, 2003 - Elsevier
[Isolation and properties of methane utilizing bacteria.](#)
LV Wake - 1972 - unsworks.unsw.edu.au

Riferimenti URL:

Soil Science Society of America Journal:
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/journal/14353043>
Journal of Soil and Water Conservation: <https://www.jsowonline.org/>
Soil Biology and Biochemistry:
<https://www.journals.elsevier.com/soil-biology-and-biochemistry/>
Geoderma: <https://www.journals.elsevier.com/geoderma/>
Agriculture, Ecosystems and Environment:
<https://www.journals.elsevier.com/agriculture-ecosystems-and-environment/>
Plant and Soil: <https://www.springer.com/journal/11104>
Applied Soil Ecology: <https://www.journals.elsevier.com/applied-soil-ecology/>
Soil and Tillage Research: <https://www.journals.elsevier.com/soil-and-tillage-research/>
European Journal of Soil Science:
<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/journal/13652389>
Journal of Agricultural Science:
<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science>