

CO₂: costituente vitale per il mondo vegetale e l'equilibrio dinamico o inquinante dannoso?

G. La Bella, B. Sammartino, A. Gallo

IEMEST - Istituto Euro-Mediterraneo di Scienza e Tecnologia
Via Michele Miraglia, 20 - 90139 Palermo

1. Contesto

Il cambiamento climatico rappresenta una delle principali sfide globali contemporanee, caratterizzata da dinamiche complesse e multidimensionali che richiedono un approccio scientifico rigoroso e integrato. La CO₂, elemento essenziale per il processo fotosintetico e il controllo del ciclo del carbonio, è al centro di dibattiti orientati: da un lato, viene identificato come gas serra responsabile del riscaldamento globale, mentre dall'altro, è considerata indispensabile per la sopravvivenza degli ecosistemi terrestri, in quanto necessaria per la vita sulla Terra e per la proliferazione degli autotrofi, capisaldi dell'intera catena alimentare.

Alla luce degli studi condotti, è continuare a riflettere sul ruolo della CO₂ nell'equilibrio della vita sulla Terra, chiedendosi quanto essa sia indispensabile per il mantenimento degli ecosistemi o, al contrario, se rappresenta un inquinante pericoloso e una possibile minaccia per la sopravvivenza della vita sulla Terra.

Questo contributo vuole proporre una riflessione scientifica integrata, evidenziando l'importanza del contributo della Geomatica, quale disciplina scientifica e tecnologica che, attraverso protocolli dedicati per il campionamento e la gestione dei dati geospaziali, permette di campionare e rappresentare parametri ambientali in maniera continua sull'intera superficie terrestre.

Tale disciplina, che si fonda sulla combinazione di competenze e strumenti derivanti da diverse aree del sapere, quali geodesia, telerilevamento, sistemi di informazione geografica (GIS), fotogrammetria, cartografia, topografia e geoinformatica, è da ritenersi imprescindibile per l'analisi e il monitoraggio dei fenomeni complessi legati al clima, alla biosfera e alla litosfera.

Attraverso un approccio multidisciplinare e rigoroso, supportato da dati satellitari, osservazioni sul campo e modelli climatici avanzati, è stato possibile analizzare le molteplici interazioni tra CO₂, cambiamenti climatici, dinamiche atmosferiche e terrestri, come presentato nel caso studio relativo all'aeroporto "Falcone e Borsellino" di Palermo, presentando come un nuovo approccio scientifico condiviso, che vada oltre la visione riduzionista del ruolo "killer" della CO₂, possa definire la complessità del sistema Terra e delle dinamiche climatiche in un quadro più equilibrato e veritiero.

2. Metodologie e Strumenti

L'approccio interdisciplinare suggerito nel presente contributo ha integrato, attraverso l'utilizzo del GIS (Geographic Information Systems), i dati multispettrali provenienti dalla missione Sentinel-2 del programma Copernicus e i dati al suolo derivanti da analisi di dataset paleoclimatici al fine di definire e sviluppare un "indice" innovativo in grado di apprezzare la capacità che hanno le piante di assimilare CO₂.

Tale indice, denominato NVCD (Normalized Vitality Carbon Dioxide), combina bande spettrali relative alla riflettanza visibile, infrarossa e a onde corte, consentendo di valutare lo stato di salute delle piante osservate e la loro capacità di "carcerare" carbonio attraverso il processo biochimico della fotosintesi clorofilliana.

Le immagini satellitari sono state "ancorate" al contesto reale attraverso l'uso delle serie storiche paleoclimatiche ricostruite attraverso la consultazione delle analisi isotopiche eseguite sulle carote glaciali e sui sedimenti oceanici, oltre alle valutazioni del campo magnetico terrestre attraverso le analisi condotte sui basalti oceanici.

Attraverso queste azioni è stato possibile introdurre nel modello predittivo i differenti contributi generati dalle forzanti naturali, come i cicli astronomici di Milanković, le variazioni dell'attività solare e le dinamiche delle correnti oceaniche e atmosferiche, i quali sono stati organizzati in un geodatabase dedicato, che ha permesso di ricostruire scenari climatici del passato ritenuti indispensabili per la verifica dell'indice e dei modelli proposti.

3. Il valore delle forzanti naturali per la validazione dei dati geospaziali

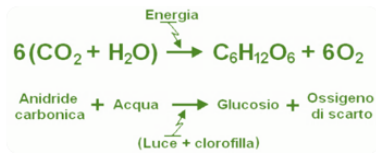
L'importanza delle tecniche e metodologie geomatiche negli studi climatici e ambientali è fondamentale per la comprensione delle dinamiche climatiche e ambientali globali del pianeta. In particolare, i dati climatici e ambientali rilevati attraverso queste tecniche si distinguono per la loro omogeneità e precisione, consentendo di coprire l'intera superficie terrestre senza operare manipolazioni matematiche per estendere l'informazione di pochi dati all'intero pianeta.

Tuttavia, per poter definire "indici" e "modelli" climatici e ambientali a partire dai dati ottenuti con le nuove metodologie, si è ritenuto indispensabile operare "ancoraggi" e "validazioni" che consentissero di determinare, con buona approssimazione, le relazioni esistenti tra questi dati e quelli derivanti dalle misurazioni al suolo e/o derivate dalle serie paleoclimatiche. Tale perfezionamento è stato ritenuto essenziale per definire l'indice NVCD e renderlo il più attendibile e rappresentativo della realtà.

La trattazione di temi così complessi necessita di un approccio integrato che possa evitare distorsioni nelle interpretazioni delle relazioni tra concentrazioni di CO₂, vegetazione e variazioni climatiche. Solo in questo modo è possibile definire una solida base conoscitiva - "bedrock scientifico certo" - che rifletta l'insieme dei contributi delle forzanti in gioco, prestando particolare attenzione a distinguere tra contributi di origine naturale e antropogenica.

Questi aspetti sono particolarmente significativi per determinare se le variazioni della temperatura globale sono attribuibili esclusivamente alla CO₂, o se invece altri gas serra e fattori naturali giocano un ruolo predominante. Inoltre, è essenziale valutare se la CO₂ rappresenta una minaccia per il mondo vegetale o, al contrario, una risorsa fondamentale per il suo sviluppo.

Il glucosio prodotto dalla fotosintesi clorofilliana rappresenta una fonte primaria di energia per la crescita vegetale ed è alla base delle catene alimentari terrestri e marine. Questo zucchero alimenta l'intero ecosistema, favorendo la produzione di biomassa vegetale e contribuendo al sequestro del carbonio atmosferico, che viene immagazzinato nelle piante e nei suoli.



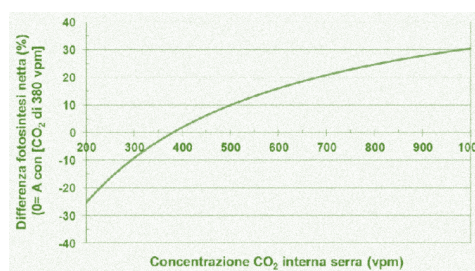
Tuttavia, il ruolo della CO₂ è al centro di un dibattito acceso: se da un lato essa è indispensabile per la crescita vegetale, dall'altro il suo accumulo eccessivo viene legato ai cambiamenti climatici in atto. È importante ricordare che senza l'effetto serra naturale, la temperatura media terrestre scenderebbe al di sotto dei -20°C, rendendo il pianeta ostile alla vita.

Tuttavia, la riduzione della copertura forestale globale, che dal periodo pre-industriale a oggi (dal 1750 a oggi), ha ridotto la superficie delle foreste dal 55% a circa il 31% della superficie terrestre, secondo le stime della FAO, ha inciso drasticamente anche sulla capacità del sequestro del carbonio, consentendo, nel contempo, anche a un suo accumulo in atmosfera come CO₂, liberato anche enormi quantità di CO₂ che era immagazzinata nelle biomasse e nei suoli.

Considerando il tasso medio stimato di assorbimento di CO₂ pari a circa 190 t/km² di foresta all'anno (Global Forest Watch), è possibile stimare una "perdita media annua di capacità di assorbimento CO₂" di 4,28×10⁹ t/anno, pari a una mancata carcerazione di CO₂ pari a 1,20×10¹² di tonnellate per l'intero periodo.

Nel contesto agricolo, la CO₂ ha dimostrato benefici significativi, specialmente negli ambienti di coltivazione protetti come le serre. Gli incrementi di concentrazione da 420 ppm a valori compresi tra 750 e 1100 ppm hanno migliorato notevolmente la produttività delle colture con ciclo fotosintetico C₃, come grano, riso e soia. Questo effetto è attribuibile alla maggiore efficienza fotosintetica in presenza di livelli elevati di CO₂, un fenomeno simile a quello osservato durante il Triassico, quando concentrazioni di 2700 ppm favorirono la crescita di rigogliose foreste.

Al contrario, le piante C₄, come mais, canna da zucchero e sorgo, non hanno mostrato un aumento significativo della produttività, poiché i loro meccanismi di

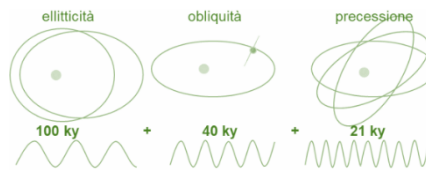


concentrazione interna di CO₂ le rendono già altamente efficienti. Tuttavia, queste piante si dimostrano più resilienti in condizioni di temperatura elevata e scarsità idrica, che si stanno intensificando a causa dei cambiamenti climatici.

Le forzanti naturali, come i cicli astronomici e le dinamiche solari, rivestono un ruolo cruciale nel modulare le variazioni climatiche globali della Terra.

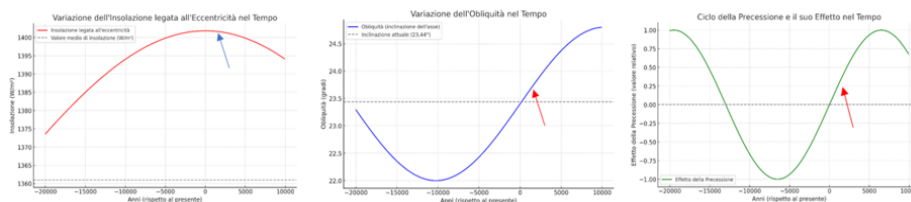
I cicli di Milanković, che comprendono eccentricità, obliquità e precessione, influenzano la distribuzione e l'intensità dell'insolazione solare, determinando l'alternanza tra periodi glaciali e interglaciali.

Attualmente, la Terra si trova in una fase di "bassa eccentricità orbitale", caratterizzata da un valore dell'insolazione di circa 1.400 W/m², sulla superficie esterna dell'atmosfera. Inoltre, l'inclinazione dell'asse terrestre posta in posizione mediana ($22,1^\circ < 23,4^\circ < 24,5^\circ$) dovrebbe garantire una distribuzione termica equilibrata di energia tra poli ed equatore.



Tuttavia, ciò non avviene per la distribuzione asimmetrica delle terre emerse presenti sulla Terra, le quali essendo concentrate nell'emisfero boreale, producono un maggiore riscaldamento e raffreddamento di tale emisfero rispetto all'emisfero australe, dove la presenza degli oceani produce un'azione di mitigazione.

Infine, la precessione dell'asse terrestre aggiunge un ulteriore elemento di complessità, in quanto l'attuale inverno boreale coincide con il perielio, comportando inverni più miti ed estati più calde, mentre nell'emisfero australe, dove l'estate coincide con l'afelio si osservano estati meno intense e inverni più rigidi.



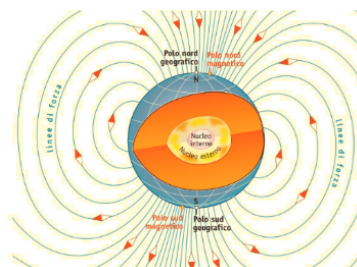
Rappresentazioni dei cicli tratte dallo studio matematico dei Cicli di Milanković (A. Gallo, G. La Bella 2022)

L'attività solare, monitorata attraverso il numero di macchie solari, mostra una relazione diretta con le variazioni climatiche.

Periodi di bassa attività, come avvenuto durante i minimi glaciali di Spöder (1450-1560), Maunder (1645-1715) e Dalton (1790-1820), sono associati a raffreddamenti globali, mentre fasi di alta attività determinano un incremento della radiazione solare incidente sulla superficie del pianeta.

Alle radiazioni solari e ai raggi cosmici è direttamente connesso il campo magnetico terrestre, il quale pur venendo definito "scudo invisibile" alle radiazioni solari e ai raggi cosmici, non viene inserito come forzante determinante delle variazioni di temperatura globali.

La presenza del campo magnetico genera intorno alla Terra un sistema di linee di forza di campo magnetico che avvolgono la Terra e si estendono nello spazio circostante come una sorta di bolla protettiva (magnetosfera). Tuttavia, il campo, a intervalli irregolari, mostra movimenti di migrazione dei poli che degenerano anche in una inversione magnetica.



Durante tali “periodi di transizione o inversione”, il campo magnetico si indebolisce significativamente, lasciando la Terra temporaneamente più vulnerabile alle radiazioni cosmiche e solari, consentendo a una maggiore percentuale di radiazioni di entrare in contatto con l’atmosfera terrestre e con la litosfera, idrosfera e biosfera, contribuendo, di fatto, a generare (indirettamente) le trasformazioni delle temperature oggi rilevate.

Gli studi paleoclimatici evidenziano che periodi di bassa intensità del campo magnetico terrestre (condizione odierna) sono associati a un incremento della copertura nuvolosa e delle precipitazioni, fenomeni dovuti alla maggiore formazione di nuclei di condensazione delle nubi e all’aumentando l’albedo.

Inoltre, la maggiore radiazione infrarossa emessa dalla litosfera e biosfera, caratterizzata da lunghezze d’onda commensurabili con quelle dei legami molecolari dei gas serra come H₂O, CH₄ e CO₂, contribuisce a un aumento dell’entropia del sistema atmosfera, determinandone un aumento delle temperature globali.

Infine, le correnti oceaniche, come l’AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), influenzano in modo significativo la distribuzione del calore sulla Terra.

Un indebolimento dell’AMOC è stato correlato attraverso dati scientifici alla riduzione delle temperature nell’Europa nord-occidentale che ha condotto all’ultimo Massimo Glaciale.

Le ricostruzioni paleoclimatiche hanno consentito di stimare, inoltre, che le fluttuazioni della AMOC durante il Pleistocene (2,58 milioni - 11.700 anni fa) hanno contribuito alle relazioni tra i cicli glaciali e interglaciali. In particolare, durante i periodi glaciali, si è rilevato che l’AMOC si indeboliva, mentre nei periodi interglaciali tendeva a rafforzarsi.



Al di là della tanto discussa “causa” o “accusa” sul chi sta determinando il rallentamento dell’AMOC, se l’odierno rallentamento dovesse continuare con questo trend o addirittura peggiorare, in Europa si avrebbe una diminuzione delle temperature medie tra 1-3° C, con punte fino a 5-10°C per quei territori posti oltre il 50° parallelo (51,5° N Parallelo di Greenwich), scenario che sembra descrivere e replicare attentamente quanto già accaduto tra il 1650 e il 1850 con la “Piccola Era Glaciale”, in cui non erano presenti le tanto reclamate azioni catastrofiste della CO₂ antropica.

La descrizione sintetica operata evidenzia l'importanza primaria di considerare le forzanti naturali nei modelli climatici, al fine di evitare interpretazioni fuorvianti che attribuiscono esclusivamente alla CO₂ il riscaldamento globale.

4. La CO₂ nella Valutazione dell'Impatto Ambientale dei Sistemi di Trasporto: Il Caso di Palermo

Il caso studio dell'area urbana di Palermo offre un esempio pratico dell'applicazione delle tecnologie geomatiche nella valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi di trasporto, da anni oggetto di interesse degli scriventi (G. Salvo, G. La Bella, 2007).

L'aumento delle concentrazioni di CO₂ derivante dalle attività antropiche, come il traffico veicolare, rappresenta una delle principali fonti di inquinamento atmosferico e la tecnologia del telerilevamento satellitare rappresenta uno strumento fondamentale per monitorare e analizzare lo stato di salute della vegetazione terrestre presente nell'intorno di queste particolari aree.

L'approccio adottato in questo contributo si basa su un'analisi complessa che combina diverse bande spettrali per stimare, in maniera indiretta, la capacità delle piante di assorbire CO₂ e di "carcerarla" sotto forma di carbonio organico.

Tale metodologia di analisi è stata realizzata attraverso tecniche come il ridimensionamento dei pixel a risoluzioni omogenee (RPER, Resize Pixel Equal Risoluzione) e la combinazione lineare di bande multispettrali rilevanti, tecniche che mirano a estrarre informazioni non direttamente accessibili tramite indici standard come NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o NDWI (Normalized Difference Water Index), andando oltre le analisi convenzionali, adottando una metodologia che conduce la ricerca verso una maggiore integrazione tra tecnologie avanzate e comprensione dei processi ecologici fondamentali.

Considerata l'impossibilità di quantificare direttamente la concentrazione di carbonio in una pianta da immagini multispettrali, è stato sviluppato un indicatore matematico denominato Normalized Vitality Carbon Dioxide (NVCD):

$$NVCD = \frac{[(B8A - B4) - (B2 + B3 + B11)]}{[(B8A + B4) + (B2 + B3 + B11)]}$$

L'analisi delle immagini multispettrali e l'utilizzo dell'indice Normalized Vitality Carbon Dioxide (NVCD) hanno confermato la rilevanza di monitorare la salute fisiologica e strutturale delle piante per comprendere il loro contributo al sequestro del carbonio atmosferico.

I dati ottenuti mostrano che la vegetazione terrestre, insieme ai suoli, è in grado di assorbire circa il 30% delle emissioni antropiche di CO₂ ogni anno, contributo che rappresenta una condizione fondamentale nella mitigazione dei cambiamenti climatici, in quanto, se correttamente gestita, potrebbe condurre a ripristinare i disastri legati alla deforestazione e rallentare l'accumulo di questo gas nell'atmosfera.

Il calcolo dell'indice NVCD ha permesso di evidenziare come le variazioni nella vitalità vegetativa siano strettamente correlate alla capacità delle piante di fissare il carbonio. In particolare, la combinazione delle bande multispettrali ha fornito una stima indiretta, ma efficace, della biomassa vegetale e dell'attività fotosintetica, offrendo uno strumento innovativo per la valutazione dell'efficienza ecologica degli ecosistemi vegetali.

Il ruolo primario delle piante per la vita sulla Terra sta sul fatto che esse costituiscono la base della catena alimentare. Pertanto, il fatto che per svolgere il processo di fotosintesi clorofilliana attraverso il quale convertono anidride carbonica e acqua in zuccheri e ossigeno è un concetto acclarato, che determina, in primis, come la CO₂ sia indispensabile per il mondo vegetale e successivamente, come in tale processo biochimico, le piante riescano a sequestrare la CO₂ atmosferica, anche se tale processo varia in funzione delle condizioni e dello stadio di sviluppo delle piante e della loro tipologia.

Gli studi indicano che le concentrazioni ottimali di CO₂ per il mondo vegetale sono prossimi a 600-700 ppm durante la fase vegetativa, ovvero quando le piante sono maggiormente impegnate nella formazione di foglie e biomassa, mentre valori di 1000-1200 ppm sono indispensabili durante la fase di fioritura, quando la pianta investe energie nella riproduzione e nella maturazione dei frutti.

Questi livelli di CO₂, molto inferiori a quelli oggi presenti in atmosfera (420 ppm), ma commensurabili con i livelli presenti durante il Triassico quando le foreste erano lussureggianti, favoriscono una maggiore attività fotosintetica, migliorando la crescita e la salute generale delle piante, le quali sviluppano steli e rami più spessi, migliorano la loro resistenza agli stress ambientali, come la siccità e gli attacchi di parassiti. Inoltre, l'aumento della CO₂ riduce il tempo necessario per completare il ciclo vitale, consentendo una transizione più rapida tra le fasi vegetativa e riproduttiva.

5. Conclusioni

Le analisi condotte dimostrano che il sistema climatico terrestre è regolato da un complesso equilibrio tra forzanti naturali e antropogeniche. La CO₂, pur essendo un elemento cruciale per il ciclo del carbonio e la produttività vegetale, non può essere considerata l'unico responsabile delle variazioni climatiche. Forzanti naturali, come i cicli astronomici, l'attività solare e le correnti oceaniche, giocano un ruolo determinante e devono essere integrati nei modelli climatici per garantire garanzie affidabili.

La Geomatica si conferma una disciplina indispensabile per la raccolta, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati geospaziali. La sua applicazione nel caso studio di Palermo ha evidenziato l'importanza di un approccio multidisciplinare e tecnologico per affrontare le sfide ambientali. L'adozione di tecnologie avanzate e la promozione di strategie sostenibili rappresentano passi fondamentali per mitigare gli effetti del cambiamento climatico e garantire un futuro più equilibrato e resiliente per il pianeta.

6. Bibliografia

- Agenzia Spaziale Europea (ESA). (2023). Programma Copernicus: Guida utente Sentinel-2.
- Berger, A., Loutre, MF, & Tricot, C. (1993). Forzatura astronomica del cambiamento climatico. Scienze della Terra.
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, SA, Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., & Skuce, A. (2013). Quantificazione del consenso sul riscaldamento globale antropogenico nella letteratura scientifica.
- Eddy, JA (1976). Il minimo di Maunder. Scienza.
- Frohlich, C., & Lean, J. (1998). L'irradianza totale del Sole: cicli e tendenze negli ultimi due decenni e incertezze associate al cambiamento climatico.
- Global Forest Watch. (2022). Monitoraggio delle foreste e dati sulle perdite.
- Gubbins, D. (2004). Processo dipendente dal tempo al confine nucleo-mantello.
- Hay, WW, & Zakevich, E. (2000). Cesare Emiliani (1922–1995): Il fondatore della paleoceanografia. *International Microbiology*, 3 (4), 247-251.
- Hays, JD, Imbrie, J., & Shackleton, NJ (1976). Variazioni nell'orbita terrestre: pacemaker delle ere glaciali.
- Gallo, La Bella IEMEST - Istituto Euro-Mediterraneo di Scienza e Tecnologia. (2023). Rapporto annuale sui cambiamenti climatici e l'utilizzo delle tecniche geomatiche. Palermo, Italia.
- Imbrie, J., & Imbrie, KP (1980). Modellazione della risposta climatica alle variazioni orbitali. *Science*, 207
- International Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contributo del Working Group I al sesto rapporto di valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press
- Lean, J., & Rind, D. (1998). Forzatura climatica attraverso la modifica della radiazione solare.
- Marshall, J., & Schott, F. (1999). Convezione in oceano aperto: osservazioni, teoria e modelli.
- Milanković, M. (1941). *Canone dell'insolazione e problema dell'era glaciale*. Belgrado: G. Koenigliche Serbische Akademie.
- NASA GISS, NOAA, HadCRUT e Berkeley Earth. (2019). Ricostruzioni della temperatura globale: metodologie e applicazioni.
- Rahmstorf, S. (2002). Circolazione oceanica e clima negli ultimi 120.000 anni. *Nature*.
- Roberts, PH, & King, EM (2013). Sulla genesi del magnetismo terrestre. Rapporti sui progressi in fisica.
- G. Salvo, G. La Bella ASITA (2007). Un approccio per una valutazione d'impatto ambientale dell'esercizio di un nodo aeroportuale.
- Solanki, SK, Krivova, NA, & Haigh, JD (2013). Variabilità dell'irradianza solare e clima.
- Stommel, H. (1961). Convezione termoalina con due regimi stabili di flusso.
- Tarduno, JA, et al. (2015). Una geodinamo dall'Adeano al Paleoarceano registrata da singoli cristalli di zircone. *Science*, 349
- Valet, JP, Meynadier, L., & Guyodo, Y. (2005). Intensità del campo geomagnetico e tasso di inversione negli ultimi 2 milioni di anni. *Nature*, 435.
- Wunsch, C. (2006). Cambiamenti climatici improvvisi: una visione alternativa.
- Zharkova, VV, Shepherd, SJ, Popova, E., & Zharkov, S. (2015). Oscillazioni della linea di base del campo magnetico solare e dell'irradianza solare su una scala temporale millenaria.