



Forest and water cycle: the biotic pump

Foreste e ciclo dell'acqua: la pompa biotica

Alessandro Bottacci

SIRF - Società Italiana di Restauro Forestale. Già Docente a contratto di *Nature Conservation*, Università di Camerino; alessandro.bottacci@gmail.com

Abstract: This is a review article on the relationship between forests and the water cycle, with particular regard to the process referred to as the “biotic pump”. The Planet is witnessing unprecedented global change. There is a sharp increase in temperature and a decrease in the availability of fresh water. Deforestation negatively affects the water cycle, modifying the natural process of long-distance transport of moist air from the ocean to the internal areas of the continents. This process, discovered only a few years ago, has been called the biotic pump, and is activated by the planet's forests, especially the natural ones. The operating mechanisms of this process, the relationship with natural forests and the negative effects of its alteration are analysed.

Key words: water cycle; atmospheric rivers; biotic pump; forest biocomplexity; deforestation; desertification.

Citation: Bottacci A., 2024 - *Foreste e ciclo dell'acqua: la pompa biotica*. *L'Italia Forestale e Montana*, 79 (3): 135-153; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1130>

Received: 19/04/2024 **Revised version:** 08/07/2024 **Published online:** 05/09/2024

*Purtroppo, è molto più facile creare
un deserto che una foresta.*

JAMES LOVELOCK

1. INTRODUZIONE

Il Pianeta sta assistendo ad un cambiamento globale senza precedenti, sia per la sua intensità sia, soprattutto, per la sua velocità di evoluzione.

Rispetto all'epoca pre-industriale si possono osservare due cambiamenti molto importanti:

- la temperatura superficiale globale è aumentata negli ultimi 200 anni di quasi 1,1°C (IPCC, 2021; GISTEMP Team, 2023),

- nonostante l'impegno degli Stati di mantenere l'aumento della temperatura del Pianeta al disotto di +1,5°C (IPCC, 2022);
- la disponibilità di acqua dolce è in progressiva diminuzione ed è in aumento la porzione di acqua salata, che rappresenta già più del 97,3 % dell'acqua totale (Kravčík *et al.*, 2007; 2021) (Tabella 1).

Sono miliardi le persone che subiscono gli effetti negativi di questi cambiamenti (Ellison *et al.*, 2017). Questi cambiamenti sono in gran parte dovuti, direttamente o indirettamente, ad interventi antropici, tra i quali deforestazione, aumento delle combustioni, cambiamento dell'uso del suolo (impermeabilizzazione, am-

Tabella 1 - Stima della quantità di acqua presente sulla Terra per comparto (da Enciclopedia Treccani, modif.).

COMPARTO		VOLUME (km ³)	%
ACQUA SALATA	Oceani	1.348.000.000	97,33105
	Laghi salati e mari interni	105.000	0,00758
	<i>Totale acqua salata</i>	<i>1.348.105.000</i>	<i>97,3386</i>
	Calotte polari e ghiacciai	28.200.000	2,03615
ACQUA DOLCE	Acque profonde	in profondità comprese tra -800 e -4000 m 4.710.000	0,34008
		in profondità comprese tra 0 e -800 m 3.740.000	0,27004
	Laghi	125.000	0,00903
	Umidità del suolo	69.000	0,00498
	Vapore atmosferico	13.500	0,00097
	Fiumi	1.500	0,00011
	<i>Totale acqua dolce</i>	<i>36.859.000</i>	<i>2,66137</i>
<i>TOTALE</i>	<i>1.384.964.000</i>	<i>100</i>	

pliamento dell'agricoltura e degli allevamenti industriali, ecc.), consumo delle risorse idriche. Il rapporto tra precipitazioni e deflusso si sta modificando, aumentando l'evaporazione e accelerando il deflusso dalla terra agli oceani. Il cambiamento climatico riduce progressivamente la disponibilità di acqua dolce e minaccia la sicurezza alimentare, acuendo i conflitti sociali e innescando migrazioni di massa (Kelley *et al.*, 2015; Padròn *et al.*, 2020).

L'acqua dolce che alimenta tutta la vita terrestre e gli usi umani, ammonta a solo circa lo 0,001% di tutta l'acqua presente sul Pianeta (Damiani, 2024). Si calcola che, entro il 2025, circa 1,8 miliardi di persone vivranno in aree colpite da scarsità di acqua potabile. In base alle più recenti stime, entro il 2030 il mondo dovrà far fronte ad un deficit di risorse idriche del 40%, secondo il cosiddetto scenario *business-as-usual* in materia di clima (2030WRG, 2009; Eberhardt *et al.*, 2019).

La carenza di acqua dolce aumenta di anno in anno, sia per la riduzione del rapporto af-

flussi/deflussi continentali, sia per la crescita dell'impronta idrica (volume di acqua necessario per la produzione dei beni e dei servizi consumati dagli abitanti di un Paese) nei Paesi industrializzati. Di fronte ad una impronta idrica media mondiale pari a 1240 m³/cap/anno, gli USA hanno una impronta doppia (2480 m³/cap/anno) (Hoekstra e Chapagain, 2007).

La presenza e la conservazione di foreste estese ed efficienti è una pre-condizione indispensabile per mantenere questi equilibri (Elison *et al.*, 2017), agendo sul ciclo dell'acqua (mantenendo inalterato il rapporto afflussi/deflussi dei continenti) e sull'assorbimento e la redistribuzione dell'energia solare (agendo sulla capacità dell'acqua di catturare e rilasciare energia sotto forma di calore latente).

Gli ecosistemi forestali sono fondamentali nella regolazione del ciclo dell'acqua e nella disponibilità di acqua dolce, considerato il fatto che il 75% dell'acqua potabile proviene dai bacini forestali (MEA, 2005; FAO, IUFRO, USDA, 2021).

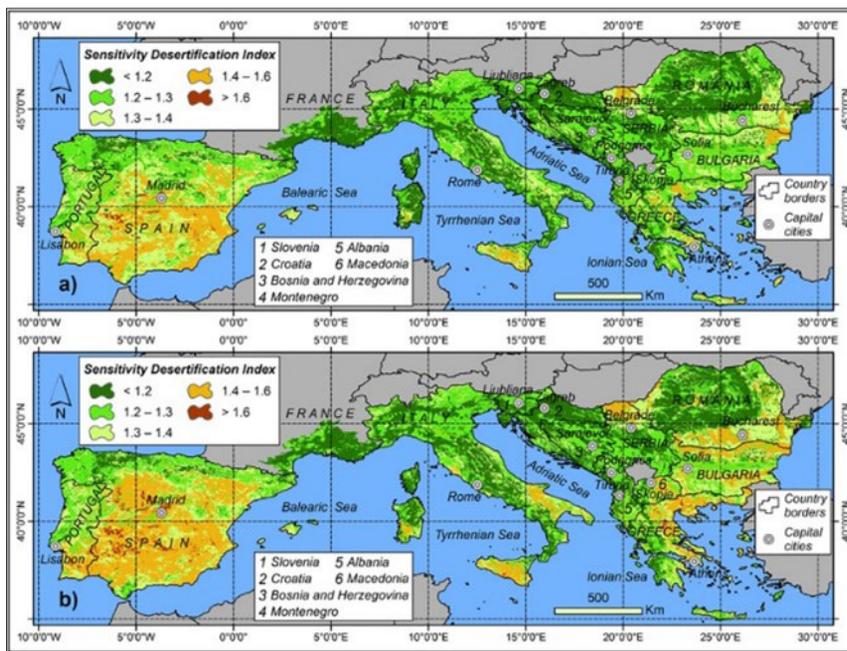


Figura 1 - Variazione dell'Indice di sensibilità alla desertificazione (SDI) nei Paesi dell'Europa mediterranea, tra il 2008 (a) ed il 2017 (b) (da Práválie *et al.*, 2017).

Per questo motivo l'accesso all'acqua (in quantità e qualità adeguata) e le temperature atmosferiche compatibili con la vita e con la produzione di alimenti, divengono il fondamento dell'equilibrio ambientale e sociale del Pianeta.

La diminuzione degli ecosistemi forestali e la loro semplificazione comportano sensibili effetti negativi su entrambi gli aspetti (temperatura e disponibilità di acqua dolce). Le variazioni a carico della copertura forestale contribuiscono per il 30% circa al cambiamento climatico globale (Wei *et al.*, 2017).

Nel periodo 1990-2020 nel mondo sono stati deforestati 420 milioni di ettari (FAO, 2022). Nella sola Amazzonia si perdono 20.000 km²/anno di foreste, ma gravi riduzioni della copertura forestale sono presenti anche nelle aree boreali (Canada e Russia) e nelle fasce tropicali asiatiche e africane (FAO, 2020).

Si stima che, se non modifichiamo il trend della deforestazione, la copertura forestale globale potrebbe ridursi di ulteriori 223 milioni di ettari entro il 2050 (Bastin *et al.*, 2019).

Una delle conseguenze più gravi della deforestazione e, in generale, del cambiamento

globale è l'aumento delle aree aride e della desertificazione, con severe conseguenze anche di ordine socio-economico (migrazioni climatiche) (Kelley *et al.*, 2015; Kaczan e Orgill-Meyer, 2020; Papa Francesco, 2023).

Le aree in cui si prevede che i rischi di desertificazione aumenteranno nel tempo sono principalmente l'Africa, il Nord America e le aree settentrionali della Cina e dell'India (Huang *et al.*, 2020).

Anche in Europa sono presenti vaste aree sottoposte a crisi idrica, in particolare le aree meridionali del continente (Spagna, Italia, Grecia), che sono considerate già in "piena emergenza" (ECA, 2018).

I risultati di una ricerca nelle aree mediterranee dell'Europa, basandosi sul SDI (*Sensitivity Desertification Index*), hanno evidenziato che ben 400.000 km² (~25% del territorio considerato) mostrano elevata e molto elevata sensibilità al degrado e, di conseguenza, alla desertificazione (Práválie *et al.*, 2017) (Figura 1).

In Italia le aree a rischio desertificazione coprono il 20% del territorio italiano (Corona *et al.*, 2006), di queste il 41% si trova nel Sud-I-

talia. La Sicilia presenta un grado medio alto di vulnerabilità ambientale sul 70% del suo territorio, la Puglia il 57%, la Basilicata il 55% (Ceccarelli *et al.* 2006; Centritto, 2015). In Italia tale situazione è decisamente aggravata dalla continua perdita di suolo libero (agricolo e naturale), che, tra il 2021 e il 2022, è ammontata a ben 71 km² (Cimini *et al.*, 2023; Munafò, 2023).

La ricerca scientifica ha evidenziato che le interazioni tra ecosistemi forestali, acqua, rocce ed energia forniscono le basi per lo stoccaggio del carbonio, per il raffreddamento delle superfici terrestri e per la produzione, conservazione, mineralizzazione e distribuzione delle risorse idriche (Ellison *et al.*, 2017).

Il presente è un articolo di *review* sul rapporto tra le foreste e il ciclo dell'acqua, con particolare riguardo al processo indicato come "pompa biotica".

2. GRANDE CICLO DELL'ACQUA: I FIUMI VOLANTI

La distribuzione dell'acqua su tutti i continenti è interessata da due tipi di flusso: il grande ciclo e il piccolo ciclo (Kravčik *et al.*, 2007; 2021).

Il grande ciclo consiste nel trasporto del vapore acqueo su grandi distanze dagli oceani alle aree più interne dei continenti. Il piccolo ciclo consiste nella concatenazione tra evaporazione, condensazione e precipitazione su territori più ristretti. Il grande ed il piccolo ciclo interagiscono tra loro, in un sistema nel quale il piccolo ciclo fornisce l'aria umida alle parti superiori dell'atmosfera e il grande ciclo la distribuisce nei territori più interni.

Illustriamo per primo il grande ciclo.

La portata del deflusso totale dalla terraferma agli oceani è di oltre 1,3 milioni di m³/s, una quantità elevatissima che può essere ben evidenziata dalla portata dei grandi fiumi come

il Rio delle Amazzoni (200.000 m³/s), il Congo (42.000 m³/s), il Chang Jian (34.000 m³/s), il Mississippi-Missouri (20.000 m³/s).

Dal momento, però, che la terraferma non si prosciuga, appare evidente che esiste un trasporto atmosferico di umidità che fa un percorso inverso, capace di compensare il deflusso gravitazionale (Makarieva e Gorshkov, 2007).

La fisica dell'atmosfera tradizionale riteneva che le correnti atmosferiche di aria umida fossero alimentate esclusivamente dai gradienti di temperatura e di pressione tra le varie porzioni della Terra, seguendo processi meramente fisici (teoria di Halley - 1686, celle di Hadley - 1735, forza di Coriolis - 1835, celle di Ferrel - 1858, ecc.).

Molto più recentemente, questi principi sono stati integrati dalla scoperta di flussi di grandi quantità di vapore acqueo che si muovono negli strati bassi dell'atmosfera (tra i 1500 e i 3000 m s.l.m.). Questi flussi furono denominati *Rios voadores* (in italiano "fiumi volanti") o "fiumi atmosferici" per la capacità di trasportare grande quantità di acqua (sotto forma gassosa) a lunga distanza (Salati *et al.*, 1979; Salati e Vose, 1984; Newell *et al.*, 1992) (Figura 2). Questi flussi sono stati individuati inizialmente nella regione Amazonica, ma studi successivi hanno evidenziato flussi simili anche nel bacino del Congo, nella Siberia, in Cina, nelle aree boreali fredde del Canada, ecc. (Gimeno *et al.*, 2014; Worden *et al.*, 2021).

Uno studio sulle aree di origine delle correnti umide evidenzia provenienze molto differenziate (Gimeno *et al.*, 2012). Alcune aree continentali ricevono l'umidità solo dallo stesso emisfero (Europa settentrionale e Nord America orientale), mentre altre ricevono l'umidità da entrambi gli emisferi (Sud America settentrionale). Le aree interessate dai regimi monsonici (India, Africa tropicale, Nord America) ricevono acqua da molte regioni, seguendo complessi sistemi di correnti umide.

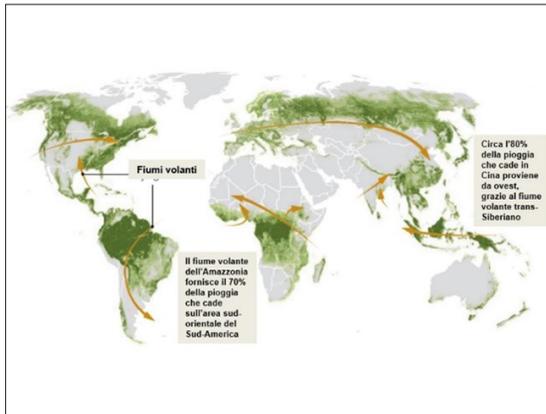


Figura 2 - I principali *fiumi volanti* che alimentano la pioggia nel Pianeta (da Pearce, 2020 modif. e trad. dall'autore).

I fiumi volanti si fermano quando incontrano barriere montuose molto alte (Ande, Himalaya, ecc.) scaricando molto vapore d'acqua, sotto forma di pioggia e determinando le sorgenti dei grandi fiumi della Terra (Marengo *et al.*, 2002; Marengo *et al.*, 2004).

Nel caso della foresta amazzonica, la forza di questi flussi di aria umida è tale che, impattando con la catena andina, variano il loro corso verso sud e alimentano il 70% delle precipitazioni che cade nel bacino del Rio de la Plata (un sistema fluviale esteso quasi 4 milioni di km²) (Fu *et al.*, 2013).

Gli studi sui fiumi volanti e sulla distribuzione dell'umidità hanno evidenziato un fenomeno straordinario: tutto il sistema è alimentato dalla traspirazione delle foreste e dalla emanazione di nuclei di condensazione, secondo un meccanismo che sarà illustrato nel prossimo paragrafo (Makarieva *et al.*, 2006).

Inizialmente si riteneva che la maggior parte del vapore acqueo, trasportato verso l'interno dei continenti, derivasse dalla evaporazione diretta degli oceani. Più recentemente i ricercatori di fisica dell'atmosfera hanno evidenziato che l'apporto della umidità atmosferica è legato al fenomeno del riciclo: nel viaggio delle correnti umide verso l'interno, il vapore,

grazie ai nuclei di condensazione, si condensa e cade sotto forma di pioggia; una parte di questa acqua scorre verso l'oceano o nelle parti più profonde della Terra, ma una parte di essa viene reimpressa nell'atmosfera dalla traspirazione della foresta, favorendo così il trasporto dell'umidità ancora più internamente e riattivando il ciclo. (Pearce, 2020).

Il valore dell'umidità riciclata dalla vegetazione è stato evidenziato per la prima volta nel bacino del Rio delle Amazzoni da Salati *et al.* (1979), utilizzando la percentuale di isotopo Ossigeno-18 (¹⁸O) presente. In natura questo isotopo è molto scarso (0,1% dell'ossigeno), ma nell'acqua riciclata dalla traspirazione della vegetazione forestale la percentuale è decisamente superiore, rispetto a quella evaporata dall'oceano. Sulla base di questi rilievi gli autori conclusero che circa metà delle precipitazioni dell'Amazzonia proveniva dal riciclo dell'acqua traspirata dalla foresta stessa.

Savenije (1995a; 1995b) ha evidenziato che, in Africa occidentale, man mano che ci si sposta nell'entroterra, la percentuale di precipitazioni provenienti dal riciclo delle foreste rispetto al totale aumentava, raggiungendo il 90% nelle aree più interne. Questo spiega anche l'aumento della aridità delle regioni del Sahel dopo la scomparsa delle foreste costiere, negli ultimi 50 anni, che ha determinato una modificazione negativa del coefficiente di deflusso in queste aree (Savenije, 1996).

Ruud van der Ent, allievo di Savenije, ha creato un modello valido del riciclo per l'intero globo (van der Ent *et al.*, 2010; 2014) giungendo alla conclusione che, a livello globale, almeno il 40% di tutte le precipitazioni proviene dal riciclo dell'acqua traspirata dalle foreste piuttosto che dall'oceano. Un risultato inatteso di questo studio è stato che il riciclo dell'acqua delle foreste boreali eurasiatiche (in particolare di quelle russe, estese su 5 milioni di km²) induce il trasporto dell'umidità

dall'Oceano Atlantico verso la Siberia, la Mongolia e la Cina. L'80% dell'acqua che precipita in quest'ultima regione arriva da ovest, con un percorso che consiste in diversi cicli di traspirazione e condensazione della durata di sei mesi.

Un recente studio nel bacino del Congo (Worden *et al.*, 2021) ha evidenziato, infine, che la maggior parte delle precipitazioni di quella area deriva dal riciclo prodotto dalle foreste pluviali (fino all'80% nella stagione delle piogge primaverili).

Questa nuova ipotesi suggerisce che la copertura forestale, soprattutto nelle aree tropicali, svolga un ruolo molto più importante nel determinare le precipitazioni rispetto a quanto precedentemente riconosciuto. In base a questa ipotesi, le precipitazioni elevate si verificano nelle aree interne continentali, come i bacini fluviali dell'Amazzonia e del Congo, soprattutto a causa della copertura forestale quasi continua dalla costa all'interno (Sheil e Murdiyarsa, 2009).

3. IL PICCOLO CICLO: LA POMPA BIOTICA

Il grande ciclo, come sopra illustrato, trasporta grandi quantità di umidità verso le aree interne dei continenti. L'apporto di acqua, sotto forma di vapore acqueo, che lo alimenta, deriva da una concatenazione di processi a scala minore, definito piccolo ciclo, in cui il principale attore sono gli ecosistemi forestali.

In realtà è stato scoperto che a favorire questo poderoso spostamento di masse di acqua è un processo più complesso di concatenazione di piccoli cicli, indissolubilmente legato alla presenza delle foreste naturali. Sono esse infatti che, secondo una recente teoria avanzata da due fisici russi, alimentano il processo definito *Pompa biotica* (Gorshkov *et al.*, 2000; Makarieva e Gorshkov, 2007).

La pompa biotica agisce prevalentemente in senso verticale, mentre i fiumi atmosferici si sviluppano prevalentemente in senso orizzontale.

Consiste sostanzialmente in un processo circolare attivato dalla traspirazione delle foreste, utilizzando l'energia solare e dissipandola sotto forma di calore latente di evaporazione (Makarieva e Gorshkov, 2010), seguendo la seguente successione: evaporazione (dagli oceani) → trasporto → condensazione → precipitazione → infiltrazione → traspirazione (delle foreste) → condensazione, proseguendo il circolo senza soluzione di continuità (Figura 3).

Per comprendere meglio il meccanismo bio-fisico che sottende alla pompa biotica occorre fare una premessa terminologica, che ritengo basilare. Sia in climatologia che in ecologia forestale si utilizza, frequentemente, il termine *evapotraspirazione* (ET). In realtà vi è una fondamentale differenza dei due termini:

- *Evaporazione* = processo meramente fisico, passivo, incontrollabile, legato al gradiente di temperatura o di concentrazione di vapore acqueo. Prevale nelle aree aperte (oceani, superfici artificiali, ecc).
- *Traspirazione* = processo biofisico attivo, regolato dalle piante, prevalentemente tramite l'apertura e la chiusura degli stomi. Prevale nelle aree a copertura forestale.

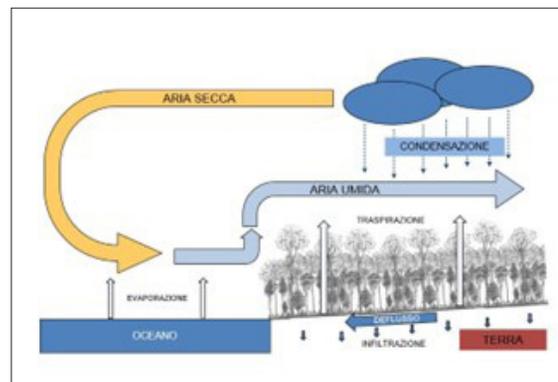


Figura 3 - Schema di funzionamento della pompa biotica (disegno originale dell'autore).

In funzione della diversa copertura del suolo, abbiamo una differente importanza relativa dell'uno e dell'altro processo.

Passando da aree nude ad aree coperte da foreste naturali, spesse e col piano delle chiome chiuso, il rapporto traspirazione/evaporazione decresce.

Potremmo creare una scala di rapporto evaporazione/traspirazione partendo dal deserto - aree nude - terreni agrari - praterie - boschi cedui - fustaie - foreste a copertura continua - foreste ad evoluzione naturale. Il rapporto traspirazione/evaporazione dipende prevalentemente dall'indice di area fogliare (LAI), come sarà illustrato più avanti nel presente lavoro.

Le aree prive di vegetazione perdono acqua quasi esclusivamente attraverso l'evaporazione. Questo processo interessa solamente la porzione più superficiale del suolo, è rapido e non controllato. In conseguenza di questo, il vapore immesso nell'atmosfera per unità di superficie è relativamente scarso.

Nelle aree coperte da foreste naturali con piano delle chiome chiuso (*closed canopy*), l'apporto di umidità nell'aria è dovuto prevalentemente alla traspirazione mentre la percentuale derivante dalla evaporazione ha un valore relativamente basso.

Le foreste assorbono attivamente l'acqua dal suolo, attingendo anche agli strati più profondi, e la trasportano fino alle foglie, immettendola nell'atmosfera sotto forma di vapore attraverso la traspirazione. In questo processo sono liberate grandi quantità di vapore acqueo che sale verso strati più alti e più freddi nei quali si raggiunge la saturazione e, successivamente, la condensazione (Makarieva *et al.*, 2013a).

$$PV=nRT \quad [1]$$

dove:

- P = pressione (Pa);
- V = volume (m³);

- n = numero moli;
- R = costante universale dei gas (8,314 Jmol⁻¹K⁻¹);
- T = temperatura (K).

Seguendo l'equazione di stato dei gas perfetti (formula 1), il passaggio dell'acqua dalla fase gassosa a quella liquida induce un calo della pressione atmosferica (caduta della pressione parziale) nella bassa atmosfera (Makarieva *et al.*, 2013b). Quando l'atmosfera, a causa della traspirazione, non è in equilibrio aerostatico si creano flussi verticali verso l'alto del vapore acqueo, che si traducono in gradienti orizzontali di pressione atmosferica tali da richiamare l'aria umida dagli oceani all'interno (Makarieva e Gorshkov, 2007).

Salendo nella colonna di aria, il vapore incontra strati più freddi e, grazie anche ai nuclei di condensazione emanati dagli alberi (Zhao *et al.*, 2017), inizia a condensarsi fino al punto di saturazione, dopo di che si ha la precipitazione dell'acqua sotto forma liquida (pioggia, rugiada, ecc.) o solida (neve, grandine, ecc.). Una parte dell'acqua evapora, una parte si infiltra nel suolo, tornando disponibile per le piante, e una parte defluisce. Contemporaneamente l'aria secca segue il percorso inverso dall'interno dei continenti all'oceano, dove ricomincia il ciclo, ricaricandosi di umidità. Il richiamo del flusso di aria umida dall'oceano alla terraferma, compensa il deflusso dalla terraferma all'oceano (*runoff*) (Makarieva e Gorshkov, 2010) e, in condizioni normali, la terra non si inaridisce.

I profili verticali di temperatura, sviluppati nelle foreste naturali ad elevata tridimensionalità e con piano delle chiome chiuso, mantengono il vapore acqueo in equilibrio aerostatico limitando la perdita di umidità del suolo per evaporazione, al contrario di quanto avviene negli ecosistemi aperti come le praterie e le foreste rade (Makarieva, Gorshkov e Li, 2006;

Bottacci, 2020); questo si riflette positivamente sulla disponibilità idrica nel terreno, alimentando il processo della pompa biotica.

L'azione della traspirazione e della condensazione nella formazione di aree a bassa pressione atmosferica, determina non solo movimenti locali ma anche a livello territoriale più ampio. Approfondendo gli studi sulla pompa biotica, Makarieva e Gorshkov (2009) hanno introdotto il concetto essenziale della *dinamica atmosferica indotta dalla condensazione* (CIAD - *condensation-induced atmospheric dynamics*). L'intensa condensazione del vapore acqueo, associata all'elevata traspirazione dalla copertura forestale naturale, produce instabilità dell'aria atmosferica su vasti territori e induce una portata stabile ed elevata del ciclo idrologico, indipendentemente dall'entità dei gradienti di temperatura orizzontali (Makarieva e Gorshkov, 2007; Makarieva e Gorshkov, 2010; Bouman, 2023).

Sulla teoria della CIAD, alla base della pompa biotica, non sono mancate critiche, specialmente sugli effetti dinamici del processo, considerati non fisicamente possibili (Jaramillo *et al.*, 2018). A tali critiche i ricercatori, che hanno scoperto il processo, hanno risposto in modo circostanziato (Makarieva *et al.*, 2019).

L'elevata evapotraspirazione e l'ampia estensione di foreste naturali garantiscono un ciclo idrologico sia stabile che ad alto rendimento, limitando forti squilibri energetici che sono alla base di inondazioni devastanti, siccità, uragani e tornado. Sostenere le foreste naturali è una valida strategia per la sicurezza idrica e la stabilizzazione del clima (Makarieva *et al.*, 2023). La velocità di condensazione è proporzionale alla velocità verticale. In assenza dell'azione mitigatrice della temperatura da parte delle foreste questa velocità si auto-alimenta, senza trovare compensazione nella capacità di assorbire energia sotto forma di ca-

lore latente. In assenza di vegetazione forestale si possono innescare eventi ad alta energia ed alta intensità.

L'effetto positivo delle foreste naturali sulla funzionalità della pompa biotica è legato anche alla struttura delle foreste stesse. Il piano delle chiome chiuso, esteso e pluristratificato controlla il processo di condensazione riducendo la velocità orizzontale a causa dell'attrito e influenzando il gradiente termico verticale (Vinod *et al.*, 2022). Nelle ore diurne il gradiente termico verticale si inverte (il suolo è più freddo del piano delle chiome) per cui la salita verticale è lenta e questo riduce la dispersione di umidità. Nelle ore notturne avviene il processo inverso, controllando la perdita di acqua, di conseguenza maggiore è l'altezza del piano delle chiome, più alto è il gradiente termico inverso (Makarieva *et al.*, 2023).

Per la proprietà di far funzionare la pompa biotica, le foreste sono state definite anche "gigantesche fontane di acqua", considerando che solo il 4% dell'acqua assorbita dalla vegetazione viene impiegata nella fotosintesi, mentre il resto 96% viene reimpresso nell'atmosfera con la traspirazione (Pearce, 2020).

La vegetazione forestale ha una elevata capacità di estrarre acqua dal suolo e rilasciarla con la traspirazione. Mentre il tasso medio di evaporazione della superficie libera degli oceani è di circa 30 m³/ha/giorno, una foresta può immettere nell'atmosfera con la traspirazione 50 m³/ha/giorno (Jasechko *et al.*, 2013).

Il meccanismo della pompa biotica si basa su una grande varietà di proprietà complesse che vedono protagoniste le foreste: dalla capacità delle radici degli alberi di diffondersi in profondità, accedendo alle acque sotterranee immagazzinate in quelli strati, alla capacità delle foglie di emettere grandi quantità di composti organici volatili di origine biologica (BVOC - *biological volatile organic compounds*), i quali, per ossidazione, producono aerosol or-

ganico secondario (SOA - *secondary organic aerosol*) che, a loro volta, agiscono come nuclei di condensazione delle nuvole (CCN - *cloud condensation nuclei*) (Hallquist *et al.*, 2009; Makarieva *et al.*, 2013a; Zhao *et al.*, 2017).

Recentemente è stato inoltre evidenziato l'importante ruolo della rete di funghi micorrizici, conosciuta anche col termine inglese *wood wide web*, maggiormente sviluppata nelle foreste evolute e indisturbate. Tra le tante funzioni assolute, questa rete ha una elevata capacità di recepire, assorbire e distribuire tra tutte le piante del popolamento l'acqua del suolo (Simard e Durall, 2004; Simard *et al.*, 2012).

Un ruolo fondamentale nella funzionalità della pompa biotica è giocato dalla superficie traspirante che viene quantificato attraverso l'Indice di area fogliare (LAI - *Leaf Area Index*) (Makarieva, Gorshkov e Li, 2006; Bréda, 2008; Tao *et al.*, 2020).

Questo indice, come noto, rappresenta il rapporto tra la somma delle aree delle singole foglie presenti nell'unità di superficie di suolo e l'unità di superficie di suolo stessa (in genere m^2/m^2) (Bréda, 2008). Nei biomi vegetali indisturbati, il valore del LAI varia da $3 \text{ m}^2/\text{m}^2$ a $19 \text{ m}^2/\text{m}^2$, il valore più alto si ha nelle foreste boreali naturali, formate per lo più da conifere, mentre per i boschi naturali di latifoglie si aggira intorno a $6\text{-}8 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Uno studio di sintesi globale delle misurazioni del LAI su più di 1000 stime pubblicate, riguardanti 15 diversi biomi, ha evidenziato che il valore medio globale è di $4,5 \pm 2,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (variando da $1,3 \pm 0,9 \text{ m}^2/\text{m}^2$, per i deserti, a $8,7 \pm 4,3 \text{ m}^2/\text{m}^2$, per le piantagioni arboree). Tra le classi di vegetazione naturale terrestre il valore medio più alto ($5,1\text{-}6,7 \text{ m}^2/\text{m}^2$) è stato rilevato nelle foreste temperate sempreverdi (Asner *et al.*, 2003). Lo stesso studio ha evidenziato una tendenza significativa alla diminuzione dei valori del LAI negli ultimi anni.

Nelle foreste naturali, con biospazio tridimensionale ampio, struttura multiplana e piano delle chiome chiuso (*closed-canopy forests*), il LAI è molto elevato; questo mantiene alti flussi di traspirazione e supporta il movimento ascendente dell'aria sulla foresta, attivando la pompa biotica. La quantità di acqua che una foresta ad elevato LAI può traspirare arriva fino a circa $10.000 \text{ l/ha/giorno}$ (Makarieva e Gorshkov, 2007).

Un altro fattore importante nel processo traspirativo è la rugosità aerodinamica delle chiome (*canopy roughness*), a sua volta legata alla complessità strutturale delle formazioni forestali naturali (Zhou *et al.*, 2006); questa caratteristica ha effetto sulla resistenza superficiale e influenza il vento, la temperatura e i profili di umidità specifica nello strato limite superficiale, nonché il bilancio energetico superficiale e lo scambio di vapore acqueo (Hansen, 1996; Brunet, 2020).

Nella foresta naturale, la maggiore rugosità aerodinamica, la maggiore altezza del piano delle chiome e il più elevato indice di area fogliare inducono una traspirazione totale decisamente più alta rispetto alle colture agrarie ed altre formazioni vegetali più basse e temporanee (Fritschen e Simpson, 1985; Iovino *et al.*, 2009; Sheil e Murdiyarsa, 2009), tutto questo a vantaggio di un miglior funzionamento della pompa biotica.

Infine si evidenzia la stretta correlazione tra energia e traspirazione. A causa delle caratteristiche fisiche dell'acqua (una delle sostanze a maggior capacità termica), il cambiamento di stato determina assorbimento o rilascio di energia sotto forma di calore latente di evaporazione. In presenza di acqua, gran parte dell'energia della radiazione solare viene investita, nella evapotraspirazione, come calore latente e contribuisce solo in minima parte alla variazione del calore sensibile (Damiani, 2024).

Il vapore acqueo, rilasciato attraverso la traspirazione, rappresenta una riserva di energia potenziale disponibile per accelerare l'aria e quindi influenzare i venti, oltre ad evitare pericolosi accumuli di energia negli strati più bassi dell'atmosfera (Makarieva *et al.*, 2013b). Per questo le foreste, in particolare quelle naturali ad elevata complessità, sono un sistema dissipativo, idoneo a impiegare efficacemente l'energia solare in arrivo sulla Terra.

Per l'evapotraspirazione di 1 g di acqua sono necessari 2440 J. Considerando le quantità di acqua traspirate, gli ecosistemi terrestri possono essere considerati gigantesche e silenziose macchine termodinamiche, capaci di utilizzare, sotto forma di calore latente, rilevanti quantitativi di energia. La maggior parte dell'energia non viene convogliata nei processi fotosintetici, ma nell'evapotraspirazione e nel ciclo idrologico (Makarieva *et al.*, 2014).

Gli ecosistemi forestali, nella loro estensione, struttura e composizione naturali, si sono evoluti per circa 480 milioni di anni per attirare l'acqua dagli oceani, distribuirla sulla terraferma, trattenere l'acqua liquida nel suolo e nei tessuti organici e rallentare il fenomeno del deflusso (Gorshkov *et al.*, 2000).

4. RIDUZIONE E SEMPLIFICAZIONE DELLE FORESTE E PERDITA DI EFFICIENZA DELLA POMPA BIOTICA

Le foreste coprono quasi un terzo della superficie terrestre globale e svolgono un ruolo essenziale nella regolazione dei processi idrologici e dei servizi ecologici, come l'approvvigionamento idrico, la purificazione dell'acqua, la mineralizzazione dell'acqua, la biodiversità, il sequestro del carbonio e, grazie allo ione idrogenocarbonato (HCO_3^-), la stabilità del pH degli ecosistemi acquatici. Tuttavia le foreste subiscono una grave ridu-

zione e alterazione in seguito al cambiamento climatico e alla trasformazione antropica dell'uso del suolo per incrementare le attività economiche (espansione agricola e urbanizzazione) (FAO, 2020).

La pioggia dipende, in modo rilevante, dalla copertura forestale. Quando le foreste vengono sostituite da pascoli o colture, l'evapotraspirazione dell'umidità dal suolo e dalla vegetazione spesso diminuisce, determinando una riduzione dell'umidità atmosferica e potenzialmente la diminuzione delle precipitazioni. È stato scoperto che, per più del 60% della superficie terrestre tropicale (latitudini da 30 gradi sud a 30 gradi nord), l'aria che è passata sopra un'estesa vegetazione nei giorni precedenti produce almeno il doppio della pioggia rispetto all'aria che è passata sopra una vegetazione scarsa (Spracklen *et al.*, 2012).

Gli effetti negativi della deforestazione sul ciclo idrologico e del carbonio sono maggiori di quelli positivi conseguenti alle nuove piantagioni (Hou *et al.*, 2023), per questo investire fondi ed energia nel solo rimboschimento, rischia di divenire un semplice palliativo, se non si diminuiscono drasticamente il taglio delle foreste evolute.

In assenza di copertura forestale alta e continua o in presenza di foreste impoverite e semplificate, la Pompa biotica perde di efficacia e il trasporto dell'umidità si limita ad alcune centinaia di km ed è meno costante. Nelle aree con copertura continua di foreste naturali la capacità di trasporto dell'umidità dall'oceano all'interno continua per migliaia di km (Bacino del Rio dell'Amazzoni o nel Bacino del fiume Yenisey, nella Siberia artica o nel bacino del fiume Congo). La riduzione degli ecosistemi forestali naturali ed efficienti, l'impermeabilizzazione del suolo, l'aumento della temperatura, la dispersione dell'acqua, la diminuzione delle risorse idriche nel sot-

tosuolo, aumentano lo squilibrio tra afflussi e deflussi e innescano processi di desertificazione (Makarieva *et al.*, 2006; Makarieva e Gorshkov, 2010).

La deforestazione ha spinto la foresta amazzonica ad una soglia critica di deperimento. Più di tre quarti della foresta pluviale amazzonica ha perso resilienza a partire dai primi anni 2000, perdita misurata, rilevata a distanza, come diminuzione della profondità ottica (*optical depth*) (Boulton *et al.*, 2022).

Il valore medio dell'Indice di area fogliare (LAI), per tutti i biomi combinati, è diminuito significativamente negli anni '90, influenzando su fotosintesi, scambi gassosi e traspirazione (Asner *et al.*, 2003). La sostituzione della copertura forestale naturale con una vegetazione a basso biospazio (altezza del piano delle chiome, profondità degli apparati radicali e superficie delle foreste) e a bassa LAI può portare a una riduzione fino a dieci volte delle precipitazioni continentali medie (Makarieva e Gorshkov, 2007). La riduzione del biospazio forestale si traduce in una minore immissione di acqua per evapotraspirazione e in un aumento del deflusso locale (Calder, 2005).

In conseguenza dell'attuale trend di deforestazione si stimano riduzioni dal 12 al 21% rispettivamente nelle precipitazioni della stagione delle piogge e della stagione secca in tutto il bacino amazzonico entro il 2050, a causa del riciclaggio dell'umidità meno efficiente (Fu *et al.*, 2013; Makarieva *et al.*, 2014).

A tale proposito, basti ricordare i processi degenerativi derivati dalla eliminazione della copertura forestale nel nord Africa, in Australia e in Cina. Le foreste continentali esistenti delle regioni ora desertificate in Australia, Arabia e il Sahara non sono sopravvissute all'eliminazione della zona forestale costiera (Makarieva e Gorshkov, 2010). Processi simili si stanno manifestando nelle regioni del Sahel in seguito alla scomparsa delle foreste costiere negli ultimi 50 anni (Xue

e Shukla, 1993; 1996; Savenije, 1995a; 1995b; 1996; Sheil e Murdiyarso, 2009).

La recente riduzione delle foreste boreali fredde della Russia, a causa di tagli e di disastrosi incendi, ha reso irregolare il flusso di aria umida che alimenta l'Asia centrale (Cazzolla Gatti *et al.*, 2021).

I risultati di una valutazione pantropicale degli impatti della perdita di foreste sulle precipitazioni nel periodo 2003-2017, mostrano che questa ha causato forti riduzioni delle precipitazioni su distanze superiori a 50 km dalla costa (Smith *et al.*, 2023). Il maggiore calo delle precipitazioni si è verificato a 200 km dalla costa, per la quale 1 punto percentuale di perdita di foresta ha ridotto le precipitazioni di circa 0,25 mm al mese. Si stima che la futura deforestazione in Congo ridurrà le precipitazioni locali dell'8-10% entro il 2100. Questo lavoro fornisce un solido argomento a favore della conservazione delle foreste tropicali per sostenere la resilienza climatica regionale. Sempre nel bacino del fiume Congo il cambiamento nell'uso del suolo e la riduzione della vegetazione della foresta pluviale sta cambiando la quantità di pioggia nel periodo primaverile e questo potrebbe influire negativamente sul benessere delle comunità locali e dei raccolti durante il resto dell'anno (Worden *et al.*, 2021).

Un cambiamento, anche piccolo, nella copertura forestale può determinare una modifica sensibile alle precipitazioni; in uno scenario di totale disboscamento della foresta amazzonica le precipitazioni potrebbero essere ridotte fino al 55-70% (Baudena *et al.*, 2021).

In assenza di copertura forestale continua, la forza di trasporto dell'aria umida si esaurisce entro 500-600 km dalla costa. Per questo, in Europa, l'effetto negativo della vasta perdita di copertura forestale a partire dal neolitico, non è stato finora percepito nella sua vera dimensione, dal momento che gran parte del territo-

rio si trova a distanze inferiori (Makarieva *et al.*, 2013b).

Nelle foreste temperate e boreali vi è una stagionalità: in estate le foreste traspirano di più e la pompa biotica ha una forza maggiore rispetto all'inverno. Nelle foreste tropicali non si ha una stasi stagionale, per cui l'attività della pompa biotica è continua (Hesslerová *et al.*, 2007; Makarieva *et al.*, 2009).

I modelli sviluppati indicano che, in conseguenza dell'attuale tasso di deforestazione su larga scala, le precipitazioni in alcune porzioni del pianeta si ridurranno fino al 30% (Spracklen e Garcia-Carreras, 2015), influenzando negativamente il regime delle precipitazioni anche a molta distanza (Ellison *et al.*, 2017) e inducendo un disseccamento a causa della interruzione del flusso di aria umida (Makarieva e Gorshkov, 2010).

Le foreste d'alta quota hanno una speciale capacità di intercettare la nebbia e le goccioline delle nuvole. La condensa sulle superfici delle piante, comprese le dense comunità epifite di licheni e muschi, fornisce ulteriore umidità per la crescita degli alberi. La riduzione e la semplificazione di queste delicate foreste influiscono negativamente su ET, infiltrazione, ricarica delle acque sotterranee e, infine, sul deflusso (Ghazoul e Sheil, 2010).

La diminuzione della capacità attrattiva delle correnti umide verso l'entroterra è correlata anche alla deframmentazione degli habitat e agli incendi boschivi, quest'ultimi conseguenza e causa dell'incremento della siccità e delle temperature (Cantin e Verdière, 2020). Se la deforestazione continuerà con questi ritmi, entro il 2050 la temperatura aumenterà di 1,45°C, rendendo più suscettibili agli incendi e alla siccità vastissime aree del Pianeta (Prevedello *et al.*, 2019).

Una ridotta efficacia della pompa biotica influisce, infine, sul deficit di pressione di vapore atmosferica (VPD - *vapour pressure defi-*

cit), una variabile critica della fotosintesi che ha avuto un forte aumento fino alla fine degli anni '90. La modellistica applicata a questa variabile prevede aumenti continui correlati ad una diminuzione della produzione primaria lorda, guidata dall'aumento della temperatura e dalla diminuzione dell'umidità (Mirabel *et al.*, 2023). Questo determinerà un rallentamento della futura crescita delle foreste e, conseguentemente una minore capacità di risposta alla deforestazione (Yuan *et al.*, 2019).

Alcuni esempi dell'importanza degli scambi energetici superficiali sono stati riportati da Xue e Shukla (1993; 1996) che hanno mostrato come la deforestazione e i cambiamenti di uso del suolo nelle regioni del Mediterraneo e del Sahel possano portare a una riduzione delle precipitazioni e a un conseguente aumento dell'aridità e dei processi di desertificazione.

Alkama e Cescatti (2016) evidenziano che la perdita di foreste influisce non solo su ciclo del carbonio, ma anche sul ciclo dell'acqua e sui flussi di energia. La deforestazione amplifica le variazioni diurne di temperatura (continentalizzazione) e aumenta la temperatura media e massima dell'aria.

L'aumento del calore sulla terraferma, a causa della perdita della copertura forestale e della modifica dell'uso del suolo verso superfici a minore capacità di assorbimento, rischia di influenzare negativamente il flusso di vapore acqueo dall'oceano alla terra e addirittura di invertirlo, richiamando umidità dalla terraferma verso l'oceano, come avviene nelle aree desertiche (Makarieva e Gorshkov, 2010). Ciò può spiegare le crescenti fluttuazioni nel ciclo idrico continentale, comprese siccità e inondazioni, e indica l'importanza, potenzialmente ancora maggiore, per la conservazione delle foreste su larga scala (Makarieva *et al.*, 2022).

La deforestazione influenza il ciclo idrologico dell'atmosfera rendendola più secca e, anche in caso di recupero della vegetazione

forestale, si deve superare un periodo (spesso lungo) nel quale le “nuove foreste”, nella fase di ricrescita, estraendo acqua dal suolo, addirittura possono anche intensificare l'aridità che possa riattivarsi la pompa biotica (Makarieva *et al.*, 2023).

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il Pianeta ha assistito negli ultimi secoli ad una riduzione drastica della copertura forestale. Contestualmente è aumentato l'uso dei combustibili fossili, causa della preoccupante crescita della concentrazione di anidride carbonica e di altri gas serra.

La riduzione ed il frazionamento della copertura forestale, specialmente nelle aree di pianura destinate all'agricoltura, hanno diminuito la funzionalità e l'efficacia della pompa biotica, cioè di quel sistema di attrazione delle correnti umide dagli oceani alle aree interne dei continenti, azionato dalla traspirazione delle foreste. Questa funzionalità è massima nel caso delle foreste naturali che hanno bio-complessità, struttura e composizione frutto di milioni di anni di evoluzione (Makarieva e Gorshkov 2007).

La maggior parte dell'acqua è indisponibile per la vita e quella disponibile proviene quasi tutta dalle foreste. Il trend combinato di aumento della temperatura e riduzione della disponibilità di acqua dolce, produce scenari di preoccupante emergenza nei prossimi anni, ai quali occorre rispondere rapidamente e decisamente, prima che sia raggiunto il punto di non ritorno.

Le foreste complesse, interagendo sul ciclo dell'acqua e sul ciclo energetico, agiscono positivamente sui due fattori a rischio (diminuzione dei serbatoi di acqua dolce disponibile e aumento della temperatura atmosferica), per cui la loro conservazione e restauro sono urgenti

per il raggiungimento degli obiettivi di adattamento, mitigazione e recupero climatico.

Nel considerare il ruolo delle foreste nella risposta al *global change*, si è data molta più enfasi al ciclo del carbonio, mentre si è sottovalutata l'importanza degli ecosistemi naturali come principali regolatori del ciclo dell'acqua e dell'energia. È urgente una inversione di paradigma da un modello prevalentemente basato sulle alterazioni del ciclo del carbonio a uno che consideri gli effetti idrologici e di raffreddamento climatico di alberi e foreste come il primo ordine di priorità (Ellison *et al.*, 2017).

Per rispondere efficacemente al cambiamento climatico e fermare il “disseccamento” della terraferma, occorrono azioni concrete di conservazione delle foreste naturali e, sul lungo periodo, di restauro delle foreste semplificate e frammentate. Occorre assolutamente tenere presente il concetto di “regolazione biotica dell'ambiente”, cioè la capacità degli ecosistemi forestali di influire attivamente e positivamente sui parametri vitali del pianeta. È ormai ampiamente dimostrato che, in condizioni di crescente destabilizzazione climatica, il valore della funzione di regolazione climatica delle foreste e, in particolare, i suoi aspetti legati al ciclo dell'acqua, aumenta rapidamente rispetto alle tradizionali funzioni economiche delle foreste (Makarieva *et al.*, 2020).

Quanto analizzato nel presente lavoro, ci permette di concludere che il ciclo intensivo dell'acqua sulla terra può essere ripristinato solo ripristinando ecosistemi forestali naturali e autosufficienti con un piano delle chiome chiuso, a scala continentale (Makarieva *et al.*, 2006).

Un intenso ciclo idrico terrestre è irrealizzabile senza il recupero di foreste naturali autosufficienti su aree continentali (Hakimovich e Alishovich, 2023). Solo la comunità ecologica naturale possiede l'insieme completo delle proprietà necessarie per controllare efficacemente il ciclo dell'acqua su un determinato

territorio. La semplice piantagione di alberi è una misura inefficace per ripristinare, nei tempi rapidi richiesti dall'emergenza, le complesse funzioni integrative del clima di terra, piante, acqua, oceani e aria in movimento (Makarieva *et al.*, 2013b).

Il Pianeta potrebbe sostenere ulteriori 0,9 miliardi di ettari di foresta continua, per cui il ripristino della copertura forestale su scala globale è, fino ad oggi, una delle soluzioni più efficaci per la riduzione dell'accumulo di anidride carbonica nell'atmosfera e del cambiamento climatico (Bastin *et al.*, 2019), pur tenendo in considerazione le critiche avanzate a questa ipotesi (Friedlingstein *et al.*, 2019).

Appare indispensabile anche una diminuzione del disturbo antropico non solo nelle grandi foreste (Amazzonia, sud-est asiatico, bacino del Congo, aree boreali del nord America e della Russia) ma anche nei boschi locali, troppo spesso oggetto di interventi di utilizzazioni senza regole. In questa linea si dovranno sostenere gli indirizzi mondiali dell'ampliamento delle aree strettamente protette, come proposto dalla strategia UE sulla biodiversità nel 2020 e da Wilson (2016).

Non si può sottovalutare, inoltre, l'urgenza di procedere al restauro delle foreste che hanno subito riduzione della biomassa e della necromassa, compressione delle tridimensionalità e frammentazione, e semplificazione strutturale e compositiva, incidendo negativamente sulla resistenza, resilienza e capacità adattativa (Bottacci, 2020).

Si dovrà portare avanti interventi di deframmentazione delle aree forestali, costituendo ampi corridoi di continuità forestale dalla costa alle aree interne, con particolare attenzione alla conservazione della vegetazione ripariale. A questo scopo si dovrà reperire e indirizzare fondi pubblici, oggi, troppo spesso, utilizzati per interventi alteranti del ciclo del carbonio e dell'acqua.

Il target dovrà essere conservare foreste efficienti, con piano delle chiome chiuse (con continuità spaziale e temporale quanto più integra) e con suolo evoluto e poroso. Occorre massimizzare le azioni di rallentare, distribuire, infiltrare l'acqua meteorica, ravvenare le falde e limitare la percentuale di acqua persa per evaporazione a favore di quella traspirata dalle chiome.

Seguendo questi indirizzi si potrà ripristinare, anche se con tempi lunghi, la pompa biotica nelle aree nelle quali è scomparsa o rallentata, facendo nostro lo slogan *no trees, no water, non trees* (niente alberi, niente acqua, niente alberi).

Come riflessione finale propongo quanto scritto da Sheil (2018): "La vita dipende dall'acqua, mentre l'acqua spesso dipende dalla vita. Comprendere queste dipendenze è fondamentale per garantire la disponibilità affidabile di acqua dolce. Sappiamo che le foreste e gli alberi svolgono un ruolo importante, anche se molti dettagli rimangono dibattuti. In futuro, le foreste dovrebbero essere protette, gestite e piantate, almeno in parte, per il loro ruolo nel sostenere l'acqua atmosferica e tutto ciò che dipende da essa. Molto ora dipende dal miglioramento della nostra comprensione. Gli scienziati forestali e altri biologi hanno un ruolo importante da svolgere."

RIASSUNTO

Il presente è un articolo di *review* sul rapporto tra le foreste e il ciclo dell'acqua, con particolare riguardo al processo indicato come "pompa biotica". Il Pianeta sta assistendo ad un cambiamento globale senza precedenti. Si registra un forte aumento della temperatura ed una diminuzione della disponibilità di acqua dolce.

La deforestazione influisce negativamente sul ciclo dell'acqua, modificando il processo naturale di trasporto a grande distanza dell'aria umida dall'oceano alle aree interne dei continenti. Questo processo, scoperto solo da pochi anni, è stato denominato *pompa biotica*, ed è attivato proprio dalle foreste, specialmente da quelle

naturali. Vengono analizzati i meccanismi di funzionamento di questo processo, la relazione con le foreste naturali e gli effetti negativi della sua alterazione.

BIBLIOGRAFIA

- 2030WRG, 2009 - *2030 Water resources group*. Annual report 2009.
- Alkama R., Cescatti, A., 2016 - *Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover*. *Science* 351: 600-604; <https://doi.org/10.1126/science.aac8083>
- Asner G.P., Scurlock J.M.O., Hicke J.A., 2003 - *Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies*. *Global Ecology & Biogeography*, 12: 191-205.
- Bastin J.-F., Finegold Y., Garcia C., Mollicone D., Rezende M., Routh D., Zohner C.M., Crowther T.W., 2019 - *The global tree restoration potential*. *Science*, 365 (6448), 76-79; <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Baudena M., Tuinenburg O.A., Ferdinand P.A., Staal A., 2021 - *Effects of land-use change in the Amazon on precipitation are likely underestimated*. *Global Change Biology*, 27: 5580-5587; <https://doi.org/10.1111/gcb.15810>
- Bottacci A., 2020 - *Lo spazio e il tempo per le foreste resilienti*. *L'Italia Forestale e Montana / Italian Journal of Forest and Mountain Environments*, 75 (2): 1-12; <https://doi.org/10.4129/ifm.2020.2.02>
- Boulton C.A., Lenton T.M., Boeri N., 2022 - *Pro-nounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s*. *Nature climate change*, 12 (march 2022): 271-278; <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>
- Bouman M., 2023 - *Investigating the biotic pump theory. A study on condensation-induced atmospheric dynamics*. MSc thesis, Meteorology and Air Quality (MAQ) Group, Wageningen University: 1-31; <https://edpot.wur.nl/634471>
- Bréda N.J.J., 2008 - *Leaf Area Index*. In: *Encyclopedia of Ecology*, p. 2148-2154; <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00849-1>
- Brunet Y., 2020 - *Turbulent flow in plant canopies: historical perspective and overview*. *Boundary-Layer Meteorology*, 177: 315-364; <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00560-7>
- Calder I.R., 2005 - *Blue Revolution: Integrated Land and Water Resources Management*. Routledge; 2. ed., 376 p.
- Cantin G., Verdière N., 2020 - *Networks of forest ecosystems: Mathematical modeling of their biotic pump mechanism and resilience to certain patch deforestation*. *Ecol. Complex.*, 43: 100850; <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2020.100850>
- Cazzolla Gatti R., Velichevskaya A., Dudko A., Fabio L., Notarnicola C., 2021 - *The smokescreen of Russian protected areas*. *Science of the total environment*, vol. 785; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147372>
- Ceccarelli T., Giordano F., Luise A., Perini L., Salvati L., 2006 - *La vulnerabilità alla desertificazione in Italia: raccolta, analisi, confronto e verifica delle procedure cartografiche di mappatura e degli indicatori a scala nazionale e locale*. APAT - CRA UCEA Manuali e linee guida, 40; 128 p.
- Centritto M., 2015 - *Siccità, degrado del territorio e desertificazione nel Mondo*. CNR, Intervento del 26/08/2015, EXPO2015, Padiglione Italia, Milano.
- Cimini A., De Fioravante P., Dichicco P., Munafò M. (a cura di), 2023 - *Atlante nazionale del consumo di suolo*. Edizione 2023. ISPRA, p. 1-47.
- Corona P., Ferrari B., Marchetti M., Barbati A., 2006 - *Risorse forestali e rischio di desertificazione in Italia. Standard programmatici di gestione*. Università della Tuscia, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Comitato Nazionale per la Lotta alla Siccità e alla Desertificazione, Roma.
- Damiani G., 2024 - *Per fare l'acqua ci vuole l'albero*. *Simbiosi*, n. 9: 75-87.
- Eberhardt U., Springgay E., Gutierrez V., Casallas-Ramirez S., Cohen R., 2019 - *Advancing the forest and water nexus - A capacity development facilitation guide*. Rome, FAO, 140 p.; <https://doi.org/10.4060/ca6483en>
- ECA, 2018 - *Combating desertification in the EU: a growing threat in need of more action*. Special report n. 33, European Court of Auditors, Luxembourg. Available from: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_33/SR_DESERTIFICATION_EN.pdf
- Ellison D., Morris C.E., Locatelli B., Sheil D., Cohen J., Murdiyarto D. et al., 2017 - *Trees, forests and water: Cool insights for a hot world*. *Global environmental change*, 43: 51-61.
- FAO, 2020 - *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome, Italy, 184 p.; <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- FAO, 2022 - *The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive*,

- resilient and sustainable economies*. Rome, FAO; <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
- FAO, IUFRO, USDA, 2021 - *A guide to forest-water management*. FAO Forestry Paper No. 185. Rome; <https://doi.org/10.4060/cb6473en>
- Friedlingstein P., Allen M., Canadell J.G., Peters G.P., Seneviratne S.I., 2019 - *Comment on "The global tree restoration potential"*. *Science*, 366 (6463); <https://doi.org/10.1126/science.aay8060>
- Fritschen L.J., Simpson J.R., 1985 - *Evapotranspiration from forests: measurement and modeling*. In: "The forest-atmosphere interaction" (Hutchison B.A, Hicks B.B eds.). Reidel Publishing Co., Boston, MS, USA, p. 293-308.
- Fu Y., Argus D.F., Freymueller J.T., Hefflin M.B., 2013 - *Horizontal motion in elastic response to seasonal loading of rain water in the Amazon Basin and monsoon water in Southeast Asia observed by GPS and inferred from GRACE*. *Advancing Earth and Space Sciences*, 40 (23): 6048-6053; <https://doi.org/10.1002/2013GL058093>
- Ghazoul J., Sheil D., 2010 - *Tropical rain forest ecology, diversity and conservation*. University Press, Oxford.
- Gimeno L., Nieto R., Vázquez M., Lavers D.A., 2014 - *Atmospheric rivers: a mini-review*. *Frontiers in earth science*, vol. 2, art. 2: 1-6; <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00002>
- Gimeno L., Stohl A., Trigo R.M., Dominguez F., Yoshimura K., Yu L. *et al.*, 2012 - *Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation*. *Rev. Geophys.*, 50, RG4003; <https://doi.org/10.1029/2012RG000389>.
- GISTEMP Team, 2023 - *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 20YY-MM-DD at <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Gorshkov V.G., Gorshkov V.V., Makarieva A.M., 2000 - *Biotic regulation of environment. Key issue of global change*. Springer-Praxis books in environmental science; 384 p.
- Hakimovich H.H., Alishovich K.B., 2023 - *The importance of reforestation in preventing desertification*. *Intent Research Scientific Journal*, 2.7: 23-29.
- Hallquist M., Wenger J.C., Baltensperger U., Rudich Y., Simpson D., Claeys M. *et al.*, 2009 - *The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues*. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 5155-5236; <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>
- Hansen F.V., 1993 - *Surface roughness lengths*. Army Research Laboratory TR-61, 51 p.
- Hesslerová P., Pokorný J., Huryna H., Harper D., 2019 - *Wetlands and forests regulate climate via evapotranspiration*. In: *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use*. Shuqing An & Jos T.A. Verhoeven Eds.; Springer Nature Switzerland AG 2019. Cham, Switzerland, p. 63-93.
- Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., 2007 - *Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern*. In: Craswell E., Bonnell M., Bossio D., Demuth S., Van De Giesen N. (Eds.), *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*. Springer, Dordrecht; https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3.
- Hou Y., Wei X., Zhang M., Creed I.F., McNulty S.G., Ferraz S.F.B., 2023 - *A global synthesis of hydrological sensitivities to deforestation and forestation*. *Forest Ecology and Management*, 529 12071; <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120718>
- Huang J., Zhang G., Zhang Y., Guan X., Wei Y., Guo R., 2020 - *Global desertification vulnerability to climate change and human activities*. *Land degradation & Development*, 31 (11): 1380-1391; <https://doi.org/10.1002/ldr.3556>
- Iovino F., Borghetti M., Veltri A., 2009 - *Foreste e ciclo dell'acqua*. *Forest@*, 6: 256-273.
- IPCC, 2021 - *Summary for Policymakers*. In: V. Masson-Delmotte *et al.* (Eds.), - *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2022 - *Summary for Policymakers*. In: Shukla P. *et al.* (Eds.) - *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA; <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Jaramillo A., Mesa J., Raymond D.J., 2018 - *Is condensation-induced atmospheric dynamics a new theory of the origin of the winds?* *J. Atmos. Sci.*, 75: 3305-3312; <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0293.1>
- Jasechko S., Sharp Z., Gibson J.J., Birks J.S., Yi Y., Fawcett P.J., 2013 - *Terrestrial water fluxes dominated by transpiration*. *Nature*, 496: 347-350; <https://doi.org/10.1038/nature11983>
- Kaczan D.J., Orgill-Meyer J., 2020 - *The impact of climate change on migration: a synthesis of recent empirical insights*. *Climatic Change*, 158: 281-300; <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02560-0>

- Kelley C.P., Mohtadi S., Cane M.A., Seager R., Kushnir Y., 2015 - *Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought*. PNAS, 112 (11): 3241-3246; <https://doi.org/10.1073/pnas.1421533112>
- Kravčik M., Pokorný J., Kohutiar J., Kováč M., Tóth E., 2007 - *Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm*. Krupa Print, Žilina.
- Kravčik M., Pokorný J., Kohutiar J., Kováč M., Tóth E., 2021 - *L'acqua per il recupero del clima*. Un nuovo paradigma dell'acqua. Biologia Ambientale, vol. 35, 1° suppl., 123 p.; <https://doi.org/10.30463/ao211.008>
- Makarieva A.M., Nefiodov A.V., Nobre A.D., Sheil D., Nobre P., Pokorný J., Hesslerová P., Li B.L., 2022 - *Vegetation impact on atmospheric moisture transport under increasing land-ocean temperature contrasts*. Heliyon, 8, e11173: 1-12; <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11173>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., 2007 - *Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11: 1013-1033; <https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., 2009 - *Condensation-induced dynamic gas fluxes in a mixture of condensable and non-condensable gases*. Physics Letters A, 373 (32): 2801-2804; <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.05.057>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., 2010 - *The biotic pump: condensation, atmospheric dynamics and climate*. International Journal of Water, 5 (4): 365-385; <https://doi.org/10.1504/IJW.2010.038729>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Li B.L., 2006 - *Conservation of water cycle on land via restoration of natural closed-canopy forests: implications for regional landscape planning*. Ecol. Res., 21: 897-906; <https://doi.org/10.1007/s11284-006-0036-6>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Li B.L., 2009 - *Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture*. Ecological Complexity, 6 (3): 302-307; <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.11.004>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Li B.L., 2013b - *Revisiting forest impact on atmospheric water vapor transport and precipitation*. Theor. Appl. Climatol., 111: 79-96; <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0643-9>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Nobre A.D., Nefiodov A.V., Sheil D., Nobre P., Li B.L., 2019 - *Commenti su "La dinamica atmosferica indotta dalla condensazione è una nuova teoria dell'origine dei venti?"*. Giornale delle scienze atmosferiche, 76: 2181-2185; <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0358.1>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Sheil D., Nobre A.D., Bunyard P., Li B.-L., 2014 - *Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content*. Journal of Hydrometeorology, 15 (1): 411-426; <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0190.1>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Sheil D., Nobre A.D., Li B.-L., 2013a - *Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics*. Atmospheric Chemistry and Physics, 13 (2): 1039-1056; <https://doi.org/10.5194/acp-13-1039-2013>
- Makarieva A.M., Nefiodov A.V., Li B.-L., 2020 - *Life's Energy and Information: Contrasting Evolution of Volume- versus Surface-Specific Rates of Energy Consumption*. Entropy, 22 (9): 1025; <https://doi.org/10.3390/e22091025>
- Makarieva A.M., Nefiodov A.V., Nobre A.D., Baudena M., Bardi U., Sheil D., Saleska S.R., Molina R.D., Rammig A., 2023 - *The role of ecosystem transpiration in creating alternate moisture regimes by influencing atmospheric moisture convergence*. Global Change Biology, 29 (9): 2536-2556; <https://doi.org/10.1111/gcb.16644>
- Marengo J.A., Soares, W.R., Saulo C., Nicolini, M., 2004 - *Climatology of the low-level jet East of the Andes derived from NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability*. Journal of Climate, 17 (12): 2261-2280.
- Marengo J.A., Douglas M.W., Silva Dias P.L., 2002 - *The South American low-level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC campaign*. Journal of Geophysical Research, 107, D20, 8079; <https://doi.org/10.1029/2001JD001188>
- MEA, 2005 - *A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being*. Island Press, Washington DC.
- Mirabel A., Girardin M.P., Metsaranta J., Way D., Reich P.B., 2023 - *Increasing atmospheric dryness reduces boreal forest tree growth*. Nat. Commun., 14, 6901; <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42466-1>
- Munafò M. (a cura di), 2023 - *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*. Edizione 2023. Report SNPA 37/23.
- Newell R.E., Newell N.E., Zhu Y., Scott C., 1992 - *Tropospheric rivers? A pilot study*. Geophysical Research Letters, 19 (24): 2401-2404; <https://doi.org/10.1029/92GL02916>

- Padròn R.S., Gudmundsson L., Decharme B., Ducharme A., Lawrence D.M., Mao J., Peano D., Krinner G., Kim H., Serevinatne S.I., 2020 - *Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change*. *Nature Geoscience*, 13: 477-481.
- Papa Francesco, 2023 - *Laudate Deum. Esortazione apostolica del 4 ottobre 2023*.
- Pearce F., 2020 - *Water makers*. *Science*, 368 (6497): 1302-1305; <https://doi.org/10.1126/science.368.6497.1302>
- Práválie R., Patriche C., Bandoc G., 2017 - *Quantification of land degradation sensitivity areas in Southern and Central Southeastern Europe. New results based on improving DISMED methodology with new climate data*. *Catena*, 158: 309-320; <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.006>
- Prevedello J.A., Winck G.R., Weber M.M., Nichols E., Sinervo B., 2019 - *Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe*. *PLoS ONE*, 14 (3): e0213368; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213368>
- Salati E., Vose P.B., 1984 - *Amazon basin: a system in equilibrium*. *Science*, 225 (4658): 129-138; <https://doi.org/10.1126/science.225.4658.129>
- Salati E., Dall'Olio A., Matsui E., Gat J.R., 1979 - *Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study*. *Water Resour. Res.*, 15: 1250-1258; <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01250>
- Savenije H.H.G., 1995a - *New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sabel*. *Journal of Hydrology*, 167 (1-4): 57-78.
- Savenije H.H.G., 1995b - *Does moisture feedback affect rainfall significantly?* *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (5-6): 507-513; [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(96\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(96)00014-6)
- Savenije H.H.G., 1996 - *The runoff coefficient as the key to moisture recycling*. *Journal of Hydrology*, 176 (1-4): 219-225; [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02776-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02776-9)
- Sheil D., 2018 - *Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle*. *For. Ecosyst.*, 5, 19; <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0138-y>
- Sheil D., Murdiyarso D., 2009 - *How forests attract rain: an examination of a new hypothesis*. *BioScience*, 59 (4): 341-347; <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.4.12>
- Simard S.W., Beiler K.J., Bingham M.A., Deslippe J.R., Philip L.J., Teste F.P., 2012 - *Mycorrhizal networks: mechanisms, ecology and modelling*. *Fungal Biology Reviews*, 26 (1): 39-60.
- Simard S.W., Durall D.M., 2004 - *Mycorrhizal networks: a review of their extent, function, and importance*. *Canadian Journal of Botany*, 82 (8); <https://doi.org/10.1139/b04-116>
- Smith, C., Baker, J.C.A., Spracklen, D.V., 2023 - *Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation*. *Nature*, 615: 270-275; <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1>
- Spracklen D.V., Arnold S.R., Taylor C., 2012 - *Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests*. *Nature*, 489: 282-285; <https://doi.org/10.1038/nature11390>
- Spracklen D.V., Garcia-Carreras L., 2015 - *The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall*. *Geophys. Res. Lett.*, 4; <https://doi.org/10.1002/2015GL066063>
- Tao F., Chen Y., Fu B., 2020 - *Impacts of climate and vegetation leaf area index changes on global terrestrial water storage from 2002 to 2016*. *Science of the Total Environment*, vol. 724; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138298>
- van der Ent R.J., Wang-Erlandsson L., Keys P.W., Savenije H.H.G., 2014 - *Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle - Part 2: Moisture recycling*. *Earth Syst. Dynam.*, 5: 471-489; <https://doi.org/10.5194/esd-5-471-2014>, 2014
- van der Ent R.J., Savenije H.H.G., Schaeffli B., Steele-Dunne S.C., 2010 - *Origin and fate of atmospheric moisture over continents*. *Water Resour. Res.*, 46 (9); <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>
- Vinod N., Slot M., McGregor I., Ordway E.M., Smith M.N., Taylor T.C. et al., 2022 - *Thermal sensitivity across forest vertical profiles: patterns, mechanisms, and ecological implications*. *New Phytologist*, 237 (1); <https://doi.org/10.1111/nph.18539>
- Wei X., Li Q., Zhang M., Giles-Hansen K., Liu W., Fan H., Wang Y., Zhou G., Piao S., Liu S., 2017 - *Vegetation cover - another dominant factor in determining global water resources in forested regions*. *Glob Chang Biol.*, 24 (2): 786-795; <https://doi.org/10.1111/gcb.13983>
- Wilson E.O., 2016 - *Half-Earth. Our Planet's Fight for Life*. Liveright Publishing Corporation, a division of W.W. Norton & Company, New York, N.Y.
- Worden S., Fu R., Chakraborty S., Liu J., Worden J., 2021 - *Where does moisture come from over the Congo basin?* *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126 (8); <https://doi.org/10.1029/2020JG006024>
- Xue Y., Shukla J., 1993 - *The influence of land surface*

- properties on Sahel climate: Part 1: Desertification.* J. Climate, 6: 2232-2245.
- Xue Y., Shukla J., 1996 - *The influence of land surface properties on Sahel climate. Part 2: Afforestation.* J. Climate, 9 (12): 3260-3275; [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<3260:TIO-SP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<3260:TIO-SP>2.0.CO;2)
- Yuan W., Zheng Y., Piao S., Ciais P., Lombardozzi D., Wang Y. *et al.*, 2019 - *Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth.* Sciences Advances, 5 (8): 1-12; <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>
- Zhao D.F., Bucholz A., Tillmann R., Kleist E., Wu C., Rubach F. *et al.*, 2017 - *Environmental conditions regulate the impact of plants on cloud formation.* Nature Communications, 8 article n. 14067; <https://doi.org/10.1038/ncomms14067>
- Zhou Y., Sun X., Zhu Z., Zhang R., Tian J., Liu Y., Yuan G., 2006 - *Surface roughness length dynamic over several different surfaces and its effects on modeling fluxes.* Sci China Ser D, 49 (Suppl. 2): 262-272; <https://doi.org/10.1007/s11430-006-8262-x>