The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Hoe lang kan de aarde groen blijven? Een klimaatmodel geeft bereiken, geen doemdatum

Negenentwintig driedimensionale klimaatsimulaties plaatsen verschillende grenzen voor de fotosynthetische biosfeer van de aarde tussen ongeveer 1,35 en 1,87 miljard jaar vanaf nu. De waarden hangen af van opzettelijk vereenvoudigde paden voor gesteenteverwering, hitte en de laagste koolstofdioxideniveaus die planten mogelijk kunnen gebruiken. Ze voorspellen niet wanneer alle planten, al het leven, de beschaving of de planeet eindigt.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Hoe lang kan de aarde groen blijven? Een klimaatmodel geeft bereiken, geen doemdatum

Een blad leeft binnen een smalle overeenkomst. Het heeft licht, water, koolstofdioxide en een temperatuur nodig die zijn chemie kan verdragen. Binnen een mensenleven lijkt de zon het vaste onderdeel van die overeenkomst. Over een miljard jaar is ze dat niet.

Terwijl de zon ouder wordt op de hoofdreeks, wordt ze langzaam helderder. Meer zonlicht verwarmt de aarde, maar de planeet heeft een reactie op lange termijn: reacties tussen regenwater, koolstofdioxide en silicaatgesteenten kunnen koolstofdioxide uit de atmosfeer verwijderen. Dat verzwakt het broeikaseffect en compenseert een deel van de opwarming. Dezelfde reactie die de planeet afkoelt, kan fotosynthetische organismen uiteindelijk beroven van de koolstof waarmee ze levend weefsel opbouwen.

Een nieuw artikel in Journal of Geophysical Research: Atmospheres vraagt welke grens het eerst kan worden bereikt: te veel hitte of te weinig koolstofdioxide. Het antwoord is geen datum waarop de aarde sterft. Over twee opzettelijk vereenvoudigde toekomstpaden liggen de aangenomen grenzen voor fotosynthetisch leven tussen ongeveer **1,35 en 1,87 miljard jaar vanaf nu**.

Dat bereik gaat over de **vegetatieve biosfeer**: het deel van het levende systeem van de aarde dat wordt gedragen door fotosynthetische organismen, vooral planten en ander leven dat licht en koolstofdioxide omzet in biologisch materiaal. Het is geen voorspelling voor elke microbe. Het is niet de levensduur van de menselijke beschaving. Het is niet de levensduur van de planeet.

De planetaire thermostaat heeft twee onzekere instellingen

De centrale onzekerheid is **silicaatverwering**. Koolstofdioxide lost op in regenwater, reageert met silicaatgesteenten en wordt uiteindelijk naar oceanen en sedimenten vervoerd. Vulkanen brengen op geologische tijdschalen koolstofdioxide terug. Samen vormen deze processen een deel van de carbonaat-silicaatcyclus, die vaak als een planetaire thermostaat wordt beschreven.

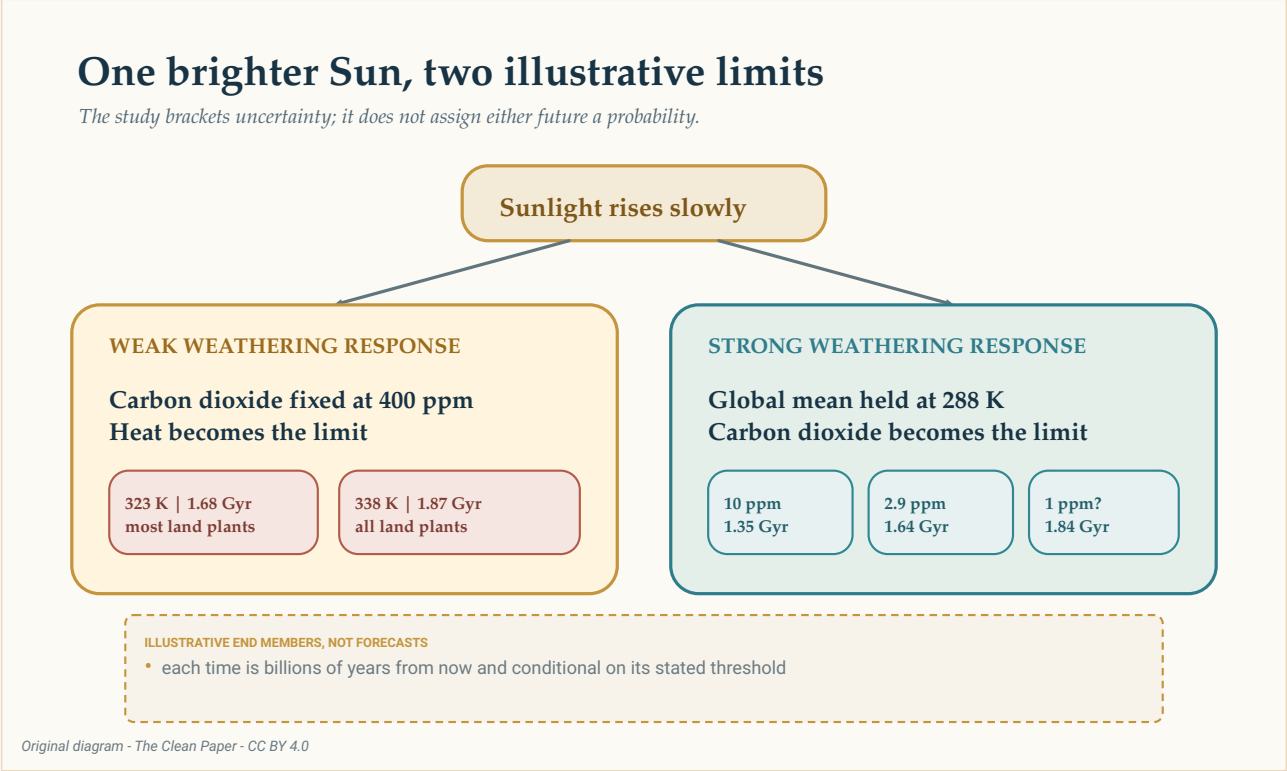
In een warmere, nattere wereld kan verwering versnellen en koolstofdioxide sneller verwijderen. Maar wetenschappers weten niet hoe sterk die reactie de aarde onder een helderder wordende toekomstige zon zal sturen. Jacob Haqq-Misra en Eric Wolf kozen daarom niet één zogenaamd correct pad. Ze modelleerden twee **eindleden**: opzettelijk extreme gevallen om de onzekerheid te begrenzen.

- In het **eindlid met zwakke verwering** blijft atmosferisch koolstofdioxide op 400 deeltjes per miljoen, terwijl de helderder wordende zon de temperatuur verhoogt.
- In het **eindlid met sterke verwering** blijft de mondiale gemiddelde oppervlaktetemperatuur op 288 kelvin, ongeveer 15 graden Celsius, terwijl koolstofdioxide wordt onttrokken naarmate de instraling toeneemt.

Geen van beide takken wordt gepresenteerd als de werkelijke toekomst van de aarde. De eerste vraagt wat hitte zou doen als koolstofdioxide hoog bleef. De tweede vraagt wat koolstofgebrek zou doen als verwering de mondiale temperatuur nabij het huidige gemiddelde hield.

Hoe kan verwering als een thermostaat werken?

De analogie gaat over terugkoppeling, niet over een letterlijke draaiknop. Wanneer een warmer klimaat chemische verwering versnelt, kan meer atmosferisch koolstofdioxide terechtkomen in opgelost materiaal, mineralen en sedimenten. Het verwijderen van dat broeikasgas werkt een deel van de oorspronkelijke opwarming tegen. Op zeer lange tijdschalen brengt vulkanische ontgassing koolstofdioxide terug.
De sterkte van elke schakel hangt af van neerslag, blootliggend gesteente, erosie, biologie, tektoniek en oceaanchemie. Daarom test het artikel grensreacties in plaats van de thermostaat als een bekende machine te behandelen.



Het artikel begrenst een onzekere toekomst met twee illustratieve eindleden. Als verwering zwak reageert, bereikt de stijgende hitte aangenomen drempels voor landplanten. Als verwering sterk reageert, bereikt dalend koolstofdioxide aangenomen drempels voor fotosynthese. Dit zijn voorwaardelijke modeltakken, geen kansen of afteldatums.

The Clean Paper CC BY 4.0

Negenentwintig gestabiliseerde modelwerelden, geen film van twee miljard jaar

De onderzoekers gebruikten ExoCAM, een driedimensionaal mondiaal klimaatmodel, om **29 stationaire klimaten** te berekenen voor combinaties van sterker zonlicht en minder koolstofdioxide. Elk geval draaide 70 modeljaren. Hier is één modeljaar één gesimuleerde jaarcyclus onder vaste omstandigheden: rekentijd om het kunstmatige klimaat te laten stabiliseren, niet één stap in een jaar-voor-jaarvoorspelling van de toekomst van de aarde. De laatste twintig jaren werden gemiddeld nadat het gesimuleerde klimaat tijd had gekregen om tot rust te komen.

Die 29 gevallen zijn afzonderlijke modelwerelden. Elke run is één punt in een raster en beantwoordt de vraag: „Welk gestabiliseerd klimaat past bij dit gekozen paar van zonlicht en koolstofdioxide?" De computer begon niet met de aarde van vandaag om vervolgens haar atmosfeer, gesteenten, oceanen en levende wezens gedurende de volgende twee miljard jaar continu te laten evolueren. In plaats daarvan trokken de auteurs de twee schematische verweringspaden door die vooraf berekende punten; het pad tussen de punten werd zelf niet gesimuleerd.

De tabel reproduceert de combinaties van zonlicht en koolstofdioxide in het officiële modelgegevensarchief. De gevalnummers zijn hier als leeshulp toegevoegd in de volgorde van het archief. **S/S0** is de relatieve zonneconstante: de inkomende zonne-energie in het model gedeeld door de huidige waarde, S0. Een waarde van 1,2 betekent dus 20 procent meer inkomende zonne-energie dan vandaag. **CO2 (ppm)** is de mengverhouding van atmosferisch koolstofdioxide in moleculen per miljoen atmosferische moleculen.

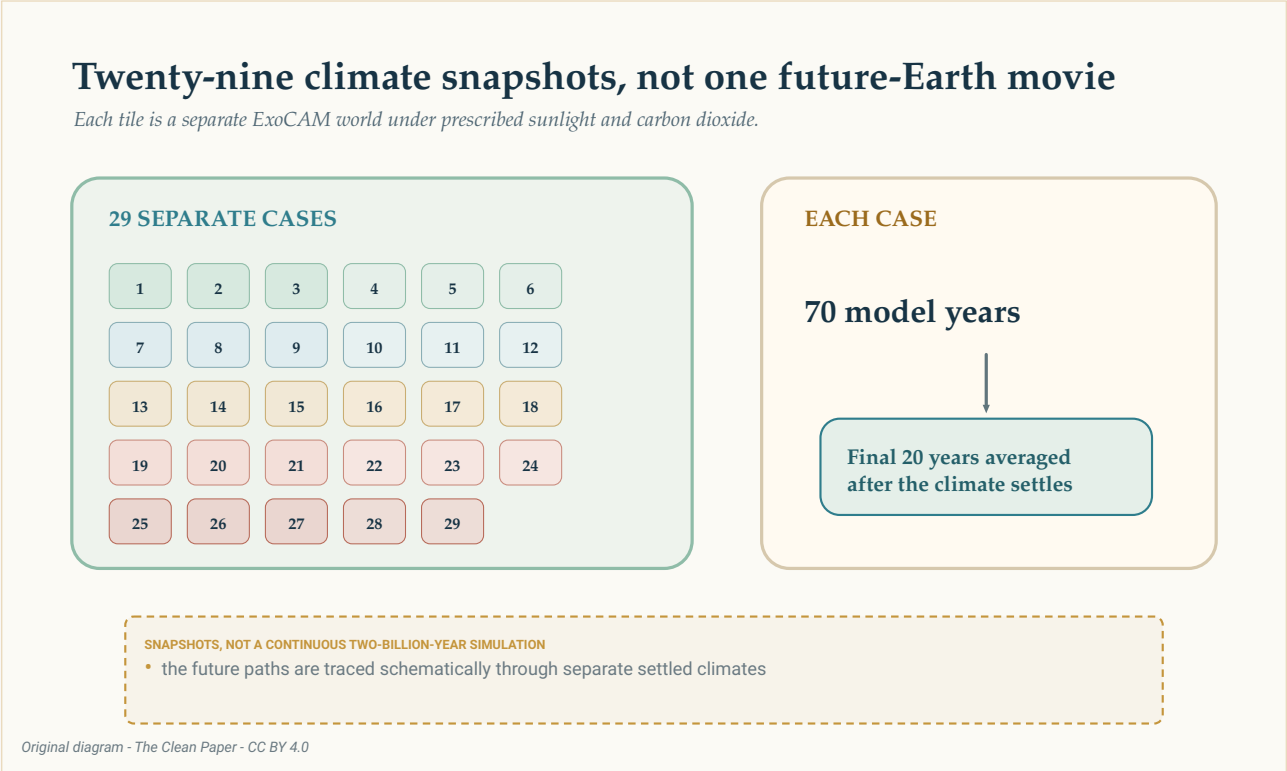
Geval	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

Geval	S/S0	CO2 (ppm)
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

De modelaarde is herkenbaar, maar opzettelijk beperkt. Ze heeft de grootte van de aarde en gebruikt de huidige geografie. Ze heeft een vereenvoudigde plaatoceaan in plaats van een volledig circulerende oceaan, een atmosferische druk die ongeveer gelijk is aan de huidige aardse waarde van één bar, en een vaste hoeveelheid methaan. Haar baan is volmaakt cirkelvormig, met nul excentriciteit, en haar rotatieas heeft geen helling, dus nul obliquiteit. Ze bevat geen expliciete bodems, vegetatie of terugkoppeling van een veranderende biosfeer. Het belangrijkst is dat het klimaatmodel niet dynamisch is gekoppeld aan een gesteenteverweringsmodel. Met andere woorden: ExoCAM berekent niet eerst de verwering, gebruikt die vervolgens om koolstofdioxide bij te werken en draait daarna het volgende klimaat in een terugkoppelingslus. De onderzoekers schreven de twee grenspaden voor en volgden ze door het klimaatgrid met 29 gevallen.

Wat betekent „stationaire toestand" in een klimaatmodel?

Een stationair geval is een modelklimaat dat onder één gekozen zon en atmosfeer de tijd krijgt om te stabiliseren. Het weer verandert binnen de simulatie nog steeds van dag tot dag en van jaar tot jaar, maar de langetermijngemiddelden drijven niet langer sterk weg.
Dat is nuttig om te vragen: „Welk klimaat past bij deze omstandigheden?" Het verschilt van het voorspellen van de exacte route waarlangs de echte aarde van de ene reeks omstandigheden naar de volgende beweegt.



Elke tegel is een afzonderlijke ExoCAM-klimaatrun van 70 modeljaren, waarvan de laatste 20 jaren zijn gemiddeld. De studie bemonsterde 29 gestabiliseerde klimaten onder voorgeschreven omstandigheden voor zonlicht en koolstofdioxide; ze simuleerde niet één continu evoluerende aarde gedurende twee miljard jaar.

The Clean Paper CC BY 4.0

Eindlid één: genoeg koolstofdioxide, te veel hitte

In de tak met zwakke verwering blijft koolstofdioxide vast op 400 deeltjes per miljoen. Naarmate de zonne-instraling stijgt, wordt hitte de beperkende factor.

Het artikel gebruikt twee mondiale gemiddelde temperatuurdrempels uit eerder werk:

- Bij **323 kelvin**, ongeveer **50 graden Celsius** als mondiaal jaargemiddelde, wordt de wereld beschouwd als te heet voor de meeste landplanten. Het model bereikt die drempel over ongeveer **1,68 miljard jaar**.
- Bij **338 kelvin**, ongeveer **65 graden Celsius** als mondiaal jaargemiddelde, wordt de wereld beschouwd als te heet voor alle landplanten. Het model bereikt die drempel over ongeveer **1,87 miljard jaar**.

Dit zijn aangenomen biologische grenzen, geen universele temperaturen waarbij elk fotosynthetisch organisme noodzakelijkerwijs faalt. Een mondiaal gemiddelde verbergt bovendien grote regionale verschillen. De studie onderzoekt afzonderlijk waar combinaties van temperatuur en water geschikt kunnen blijven, maar een label op een klimaatkaart kan niet elk toekomstig toevluchtsoord of elke aanpassing catalogiseren.

Eindlid twee: verdraaglijke temperatuur, te weinig koolstofdioxide

In de tak met sterke verwering wordt de mondiale gemiddelde temperatuur op 288 kelvin gehouden, ongeveer 15 graden Celsius, terwijl atmosferisch koolstofdioxide daalt. Hier hangt het antwoord af van hoe weinig koolstof verschillende fotosyntheseroutes mogelijk kunnen gebruiken.

- Bij de traditionele drempel van **10 deeltjes per miljoen** — tien koolstofdioxidemoleculen per miljoen atmosferische moleculen — wordt de grens voor C4-fotosynthese over ongeveer **1,35 miljard jaar** bereikt. C4-fotosynthese wordt gebruikt door planten waaronder maïs en suikerriet en concentreert koolstofdioxide rond het enzym dat het vastlegt.
- Een alternatieve C4-drempel van **2,9 deeltjes per miljoen**, besproken in eerder werk, verschuift dit naar ongeveer **1,64 miljard jaar**.
- Een voorlopige drempel van **1 deeltje per miljoen**, gekoppeld aan mogelijke overleving van sommige CAM-planten — planten met crassulaceanenzuurmetabolisme, die de opname van koolstofdioxide 's nachts scheiden van het gebruik ervan overdag — of waterplanten die opgelost bicarbonaat kunnen gebruiken, verschuift dit naar ongeveer **1,84 miljard jaar**.

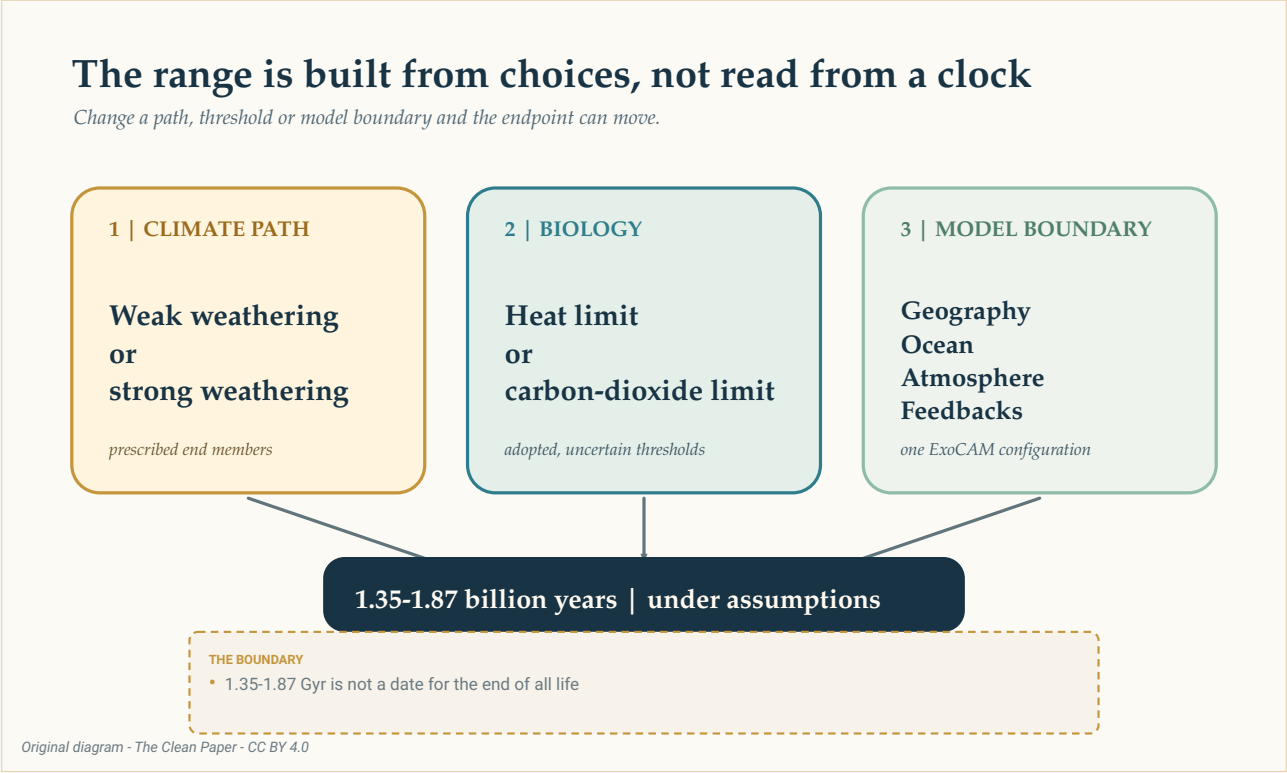
Bij het laatste getal hoort de grootste biologische kanttekening. De auteurs noemen de grens van één deeltje per miljoen expliciet voorlopig. Het is geen experimenteel vastgestelde overlevingsdrempel voor alle CAM-planten of watervegetatie onder omstandigheden van een toekomstige aarde.

> **C3, C4 en CAM zijn strategieën, geen ladder**
>
> Planten gebruiken verschillende biochemische routes om koolstof vast te leggen. **C3-fotosynthese** komt het meest voor. **C4-fotosynthese**, gebruikt door planten waaronder maïs en suikerriet, concentreert koolstofdioxide rond het enzym dat koolstof vastlegt en kan beter werken wanneer koolstofdioxide schaars is. **Crassulaceanenzuurmetabolisme (CAM)** scheidt de opname en het gebruik van koolstof over nacht en dag, waardoor veel planten water besparen.
> Dit zijn families van strategieën met veel verschillen tussen soorten, geen opeenvolgende niveaus van „betere" planten. De zeer lage koolstofdioxidedrempels in het artikel zijn aannamen om mogelijke grenzen te verkennen, geen garanties dat een toekomstig ecosysteem zal evolueren om ze te benutten.

Waarom 1,86 miljard jaar geen vervaldatum is

De vaak aangehaalde schatting van ongeveer **1,86 miljard jaar** is het gemiddelde van de twee optimistische boveneindpunten: 1,84 miljard jaar in de door koolstofdioxide beperkte tak en 1,87 miljard jaar in de door hitte beperkte tak. Het is een compacte samenvatting van twee verschillende scenario's. Het is geen derde modelresultaat met grotere precisie en geen beste schattingsdatum.

Zelfs het bredere bereik van 1,35 tot 1,87 miljard jaar heeft niet één bijbehorende waarschijnlijkheid. De onder- en bovengrens hangen af van verschillende aannamen over verwering, verschillende biologische drempels en één klimaatmodelconfiguratie. Het bereik meet de keuzes in het experiment evenzeer als tijd.



Het bereik van 1,35 tot 1,87 miljard jaar ontstaat pas na keuze van een verweringspad, een biologische drempel en een modelgrens. Het is een kaart van aannamen, geen klok die eindigt met het uitsterven van al het leven.

The Clean Paper CC BY 4.0

Andere grenzen kunnen eerder komen

De langste schattingen voor de vegetatieve biosfeer naderen een afzonderlijke, onzekere grens: een vochtig of op hol geslagen broeikaseffect dat groot oceaanverlies kan veroorzaken. Klimaatmodellen verschillen sterk over het moment waarop zulke toestanden onder toenemend zonlicht beginnen, vooral ver van de huidige omstandigheden. Sommige schattingen plaatsen ze vóór de meest optimistische fotosynthesegrens.

Dat betekent dat de boventak niet mag worden gelezen als een belofte dat de aarde haar oceanen, vertrouwde continenten of bewoonbare oppervlaktecondities tot 1,87 miljard jaar vanaf nu zal behouden. Het model bevat evenmin toekomstige plaattektoniek, veranderingen in landoppervlak, evoluerende ecosystemen of een volledig dynamische oceaan. Ook de berekeningen van hoe de atmosfeer energie absorbeert en uitstraalt worden doorgeduwd naar regimes met intense instraling en uiterst weinig koolstofdioxide, waarin modellen uiteenlopen.

Evolutionaire aanpassing en technologische interventie verschijnen in de discussie van het artikel als mogelijkheden. Ze zijn geen uitkomsten van de 29 klimaatsimulaties. Het model laat niet zien dat toekomstige organismen een fotosyntheseroute voor één deeltje per miljoen evolueren, en evenmin dat een beschaving de atmosfeer een miljard jaar beheert.

Dit is geen resultaat over de huidige klimaatcrisis

De helderder wordende zon werkt over honderden miljoenen tot miljarden jaren. De moderne, door mensen aangedreven opwarming komt door snel stijgende broeikasgassen over decennia en eeuwen. Het zijn verschillende aandrijvingen op radicaal verschillende tijdschalen, die verschillende vragen beantwoorden.

Niets in deze studie verzwakt het bewijs voor de huidige klimaatverandering of pleit voor uitstel van actie. Een biosfeer die onder één ver modelscenario misschien enig fotosynthetisch leven behoudt, is niet hetzelfde als een klimaat waarin de huidige samenlevingen en ecosystemen veilig blijven.

Het artikel is waardevol omdat het een verre vraag gedisciplineerder maakt. Het laat zien dat eerdere, eenvoudigere modellen mogelijk te sterk opwarmden wanneer zonlicht toenam terwijl koolstofdioxide vast bleef, en dat fotosynthetisch leven mogelijk meer routes naar voortbestaan heeft dan één canonieke koolstofdrempel suggereert. Het laat ook zien waarom elke extra fractie van een miljard jaar vastzit aan een keten van aannamen.

De zon die een blad voedt verandert langzaam. Of de aarde nog 1,35, 1,87 of een ander aantal miljarden jaren groen blijft, zal afhangen van hoe gesteenten, water, atmosfeer en leven samen reageren. Het eerlijke resultaat is geen datum. Het is een ruimer beeld van de overeenkomst.

Heldere samenvatting

Een driedimensionale klimaatstudie vraagt hoe lang de vegetatieve — fotosynthetische — biosfeer van de aarde kan voortbestaan terwijl de zon langzaam helderder wordt. De onderzoekers berekenden 29 afzonderlijke stationaire klimaten en trokken er twee illustratieve eindleden doorheen. Bij zwakke verwering en koolstofdioxide vast op 400 deeltjes per miljoen worden aangenomen hittegrenzen voor landplanten over ongeveer 1,68 en 1,87 miljard jaar bereikt. Bij sterke verwering en een mondiale gemiddelde temperatuur vast op 288 kelvin, ongeveer 15 graden Celsius, worden aangenomen koolstofdioxidegrenzen voor fotosynthese over ongeveer 1,35, 1,64 en — met een voorlopige drempel — 1,84 miljard jaar bereikt. De vaak aangehaalde 1,86 miljard jaar is slechts het afgeronde gemiddelde van de twee optimistische boveneindpunten. Dit zijn scenarioafhankelijke modelbereiken, geen datum waarop de aarde, de mensheid of al het leven eindigt. Het model gebruikt voorgeschreven paden, de huidige geografie, een plaatoceaan en geen expliciete koppeling tussen bodem en vegetatie of tussen klimaat en verwering, en de langste schattingen naderen onzekere grenzen voor broeikaseffect en oceaanverlies.

Zonder omwegen

Wat het artikel laat zien: In deze ExoCAM-configuratie warmen driedimensionale klimaten bij toenemend zonlicht en vast koolstofdioxide doorgaans minder op dan de vereenvoudigde vergelijkingsmodellen. Over twee voorgeschreven verweringseindleden en verschillende aangenomen biologische drempels liggen de grenzen voor de vegetatieve biosfeer tussen ongeveer 1,35 en 1,87 miljard jaar vanaf nu.

Wat plausibel maar niet vastgesteld is: Dat sommige CAM-planten of waterplanten die opgelost bicarbonaat gebruiken fotosynthese kunnen volhouden nabij één deeltje per miljoen atmosferisch koolstofdioxide; dat aanpassing of technologie fotosynthetisch leven verder kan verlengen; en dat het werkelijke klimaat-verweringspad tussen de twee modeleindleden zal blijven.

Wat het niet laat zien: Een vaste datum voor het einde van alle planten, al het leven, de menselijke beschaving, de oceanen van de aarde of de planeet; één continue simulatie van de volgende twee miljard jaar; of een reden om de huidige, door mensen veroorzaakte klimaatverandering te bagatelliseren.

Belangrijkste beperkingen: Negenentwintig stationaire gevallen uit één klimaatmodelfamilie; voorgeschreven in plaats van dynamisch gekoppelde verweringspaden; huidige geografie; een plaatoceaan; vast methaan; nul obliquiteit en excentriciteit; geen expliciete bodems, vegetatie of biosfeerterugkoppeling; onzekere hitte- en koolstofdioxidedrempels; en grote onenigheid tussen modellen nabij vochtige en op hol geslagen broeikasomstandigheden.

Hoeveel vertrouwen moet een algemene lezer hebben? Veel vertrouwen dat de studie het plausibele modelbereik verbreedt en de aannamen identificeert die het bepalen. Redelijk vertrouwen in het numerieke bereik als nuttige begrenzing binnen dit model. Weinig vertrouwen in een exacte datum, omdat de verste eindpunten afhangen van opzettelijk extreme klimaatpaden en onzekere biologie.

Bronnen

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870