

Il circolo vizioso dell'Amazzonia

Siccità e incendi nella "serra"

Punti critici ecologici e climatici della foresta tropicale più grande del mondo e misure pratiche di prevenzione



Rapporto al WWF (World Wide Fund for Nature) realizzato da Daniel C. Nepstad (Woods Hole Research Centre)- 2007

Con la collaborazione del Woods Hole Research Center, dell'Instituto de Pesquisa Ambiental de Amazonia, dell'Universidade Federal de Minas Gerais (con particolare ringraziamento a Britaldo Soares Filho, Claudia Stickler, Paul Lefebvre, Paulo Moutinho, Karen Schwalbe e Wendy Kinglerlee).

Una revisione scientifica indipendente del rapporto è stata effettuata da Yadvinder Malhi, Professore di Ecosystem Science alla Oxford University.

*Edizione italiana curata da Gianfranco Bologna
Traduzione dall'inglese di Patrizia Zaratti*

Indice

Sommario pag. 3

**Il profondo collegamento fra foresta amazzonica e clima
Il punto di non ritorno potrebbe essere più vicino di quanto si pensi
Possibilità di tornare sui propri passi**

Introduzione pag. 6

Siccità, incendi e punto critico ecologico pag. 8

**Deforestazione, fumi, riscaldamento globale e punto critico ecologico
pag.13**

**Le nuove pressioni alla deforestazione possono accelerare il processo
degenerativo (*dieback*) pag. 16**

Il *dieback* si sta rapidamente avvicinando? pag.18

Evitare un punto critico dell'Amazzonia: processi chiave pag.20

Conclusioni pag.22

Bibliografia citata pag. 24

Sommario

La parola “Amazzonia” evoca nella nostra mente vaste foreste pluviali, il sistema fluviale più grande del mondo, una profusione di diversità di vite, culture e una biodiversità profondamente fuse fra loro e interdipendenti. In questo intreccio di piante e animali si trovano, ancora nascosti, cure per malattie e componenti per la tecnologia molecolare, che risultano essenziali per alleviare la vita degli esseri umani sul pianeta. Inoltre, nel profondo della foresta vivono ancora società indigene che non sono mai entrate in contatto con l’uomo moderno.

Ora l’Amazzonia ha assunto anche un nuovo significato: in tutto il mondo, essa è diventata il simbolo della dipendenza dell’umanità dagli ecosistemi naturali. L’Amazzonia modella il clima, come lo conosciamo oggi, e può essere messa in pericolo da un clima mondiale sempre più caldo e imprevedibile.

Scopo di questo rapporto è esplorare la relazione fra l’Amazzonia e il clima e i cambiamenti che in questa relazione stanno sopravvenendo, in conseguenza della distruzione delle foreste e dell’emissione nell’atmosfera di gas a effetto serra, cercando di interpretare le migliori informazioni disponibili per determinare la vicinanza del punto di non ritorno rispetto al processo degenerativo un *dieback* della foresta amazzonica e per identificare le eventuali azioni da intraprendere per contrastare questo processo.

Il profondo collegamento fra foresta amazzonica e clima

1. la foresta amazzonica nel suo complesso è strettamente collegata al clima mondiale. Primo, influenza il clima agendo, a livello del terreno, come un gigantesco consumatore del calore, assorbendo, attraverso l’evaporazione dell’acqua tramite le foglie, metà dell’energia solare che la raggiunge.¹ Secondo, rappresenta un grande serbatoio di carbonio abbastanza sensibile, che “sgocciola” nell’atmosfera tramite la deforestazione, le siccità e gli incendi, contribuendo all’accumulo di gas atmosferici a effetto serra, che causano il riscaldamento globale. Terzo, l’acqua che defluisce da queste foreste nell’Oceano Atlantico rappresenta il 15-20% del deflusso fluviale globale totale e potrebbe essere sufficiente per influenzare alcune delle grandi correnti oceaniche che, da sole, rappresentano degli importanti regolatori del sistema climatico globale. *La conservazione della foresta amazzonica è necessaria per stabilizzare il clima mondiale.*
2. L’Amazzonia si trova all’apice di un periodo di drammatiche trasformazioni dovute ai cambiamenti climatici. Il riscaldamento globale potrebbe ridurre le precipitazioni nell’Amazzonia orientale di più del 20%, aumentando contemporaneamente la temperatura generale dell’intera regione di più di 2°C, forse addirittura di 8°C, entro la fine del secolo se non saremo in grado di effettuare le drastiche riduzioni di emissioni di gas a effetto serra necessarie per evitare pericolosi mutamenti climatici. Le siccità più gravi si verificheranno nell’Amazzonia orientale e, unitamente alla tendenza al riscaldamento, potrebbero essere rinforzate dal *dieback* su larga scala delle foreste pluviali di questa regione, che vengono sostituite da una vegetazione semi-arida, simile a quella presente nella savana. *La stabilizzazione del clima mondiale è necessaria per preservare la foresta amazzonica.*

¹ La maggior parte dell’energia contenuta nell’acqua viene rilasciata quando il vapore si condensa per formare le nuvole e la pioggia; questo meccanismo costituisce uno dei motori principali della circolazione atmosferica mondiale.

Il punto di non ritorno potrebbe essere più vicino di quanto si pensi

1. Nei prossimi 15-25 anni, molti dei cambiamenti attualmente in corso in Amazzonia potrebbero portare a un'ampia conversione e al degrado delle foreste amazzoniche, ben oltre il *dieback* di fine secolo, previsto per la foresta da alcuni modelli. Gli attuali *trend* relativi all'espansione dell'agricoltura e dell'allevamento, agli incendi, alla siccità e al taglio illegale di legname potrebbero far sparire o danneggiare gravemente il 55% della foresta pluviale amazzonica entro il 2030.
2. *Il grave ed esteso degrado della foresta potrebbe subire un'accelerazione legata all'influenza sinergica di alcuni circoli viziosi di feedback esistenti fra, e all'interno degli ecosistemi e il clima della regione amazzonica.* Se la foresta amazzonica dovesse raggiungere il suo punto di non ritorno, le prospettive di conservazione della foresta pluviale amazzonica diminuirebbero enormemente, mentre aumenterebbero la perdita di biodiversità e le emissioni di gas serra della regione.
3. *Il punto critico di non ritorno ecologico* verrà raggiunto quando le foreste native, che offrono resistenza agli incendi, saranno degradate in arbusti facilmente incendiabili a causa dei ripetuti danneggiamenti legati a siccità, attività di taglio o combustione. Tale punto di non ritorno è favorito dai circoli viziosi legati agli incendi di questa regione. Le foreste bruciate risultano più suscettibili a ulteriori incendi, in quanto gli alberi bruciati permettono la penetrazione di una maggiore quantità di luce solare all'interno della foresta, facendo seccare le foglie morte e i rami sul terreno. Dopo un incendio la foresta viene invasa da erbe, felci e bambù infiammabili e tale invasione rinforza il circolo vizioso della combustione aumentando la quantità di "carburante" presente sul terreno della foresta. Il punto di non ritorno ecologico viene favorito da alcune pratiche agricole, strettamente connesse agli incendi, che forniscono grandi quantità di fonti di combustione, come l'allevamento di bestiame e l'agricoltura basata sul taglio e l'incendio della vegetazione.
4. *Il punto critico di non ritorno climatico* viene raggiunto quando la deforestazione, i fumi, le anomalie della temperatura della superficie del mare, come gli episodi di *El Niño*, e lo stesso riscaldamento globale inibiscono le precipitazioni su scala regionale. Tale punto di non ritorno climatico si perpetua da solo in automatico, in quanto favorisce il degrado e la combustione delle foreste, che a loro volta riducono l'emissione di vapore acqueo e aumentano quella di fumi nell'atmosfera, due azioni che diminuiscono le precipitazioni. L'inibizione delle precipitazioni dovuta alla deforestazione sembra diventare più forte quando il disboscamento supera il 30%.
5. *La deforestazione dell'Amazzonia potrebbe accelerare* in futuro a causa di due *trend* principali. Primo, la crescente richiesta mondiale di soia, biocarburanti e carne sta aumentando il rendimento delle produzioni derivanti dall'agricoltura e dall'allevamento in Amazzonia, rafforzando così gli incentivi per gli agricoltori e gli allevatori a convertire le loro riserve forestali, richieste legalmente, in terreni agricoli e pascoli. Secondo, il rischio di incendi accidentali scoraggia i proprietari terrieri dall'investire in piantagioni di alberi sensibili al fuoco, in una gestione forestale o in miglioramenti dei pascoli, rinforzando la dipendenza dall'allevamento estensivo di bestiame (con basse densità di vegetazione per

pascolo) e dall'agricoltura basata sul taglio e l'incendio della vegetazione che, di contro, aumentano ulteriormente il rischio di incendi accidentali.

6. *Questa sinergia fra foreste amazzoniche, economie e clima favorisce il verificarsi di un dieback forestale su larga scala nei prossimi 15-25 anni.* In uno scenario di *dieback*, gli incendi delle foreste risultano sempre più comuni, l'allevamento estensivo del bestiame e l'agricoltura basata sul taglio e l'incendio della vegetazione, ambedue dipendenti dagli incendi, forniscono un fronte sempre maggiore di fonti d'incendio, e la frequenza delle siccità regionali aumenta a causa della diminuita traspirazione e dell'aumentata produzione di fumi. La crescente richiesta di soia, biocarburanti e carne aumenta i profitti derivanti dalla deforestazione.
7. Il degrado su larga scala delle foreste amazzoniche potrebbe accelerare la degenerazione climatica globale, influenzando le precipitazioni in luoghi sperduti del pianeta. Le previsioni per il periodo di tempo da oggi al 2030, descritte al punto 1), prevedono l'emissione di 15-26 miliardi di tonnellate di carbonio nell'atmosfera, equivalenti a 1,5-2,6 anni delle attuali emissioni mondiali di carbonio. Un'ulteriore distruzione della foresta amazzonica porterà a un'anticipazione dei cambiamenti nelle precipitazioni in altri luoghi del pianeta. Alcuni modelli indicano che in India e in America Centrale le precipitazioni potrebbero diminuire e che nelle cinture del grano del Brasile e degli Stati Uniti si potrebbe verificare una diminuzione delle precipitazioni durante la stagione di crescita dei raccolti.
8. *Anche gli attuali trend economici e i cambiamenti climatici su scala regionale e mondiale potrebbero distruggere importanti ecoregioni dell'Amazzonia, come la foresta di Maranhão babaçu, la foresta secca di Marañon e le foreste di nubi della Bolivia.* Dati i trend attuali, nei prossimi decenni molte specie di animali, fra cui diversi primati, perderanno più dell'80% del loro habitat di foresta primaria.

Possibilità di tornare sui propri passi

1. *Diversi processi e circoli virtuosi potrebbero preservare l'Amazzonia dal raggiungere questi punti di non ritorno* e costituire le fondamenta di una nuova e coraggiosa strategia di conservazione dell'Amazzonia.
2. Il *circolo virtuoso ecologico* rappresenta la tendenza delle foreste a ricrescere rapidamente dopo gli incendi periodici. Entro 15 anni, la maggior parte delle terre degradate dell'Amazzonia, se protetta dal fuoco, potrebbe tornare allo stato di foresta chiusa recuperando la funzione di stabilizzatore delle precipitazioni della foresta primaria. Ogni anno trascorso senza incendi diminuisce l'infiammabilità della foresta e aumenta la quantità di nuvole cariche di pioggia che formano vapore che si accumula nell'atmosfera.
3. Nel *circolo virtuoso climatico* il ripristino della produzione di vapore acqueo della foresta (traspirazione) su ampi paesaggi per mezzo della ricrescita forestale e della messa a dimora di alberi, unitamente alla riduzione degli incendi, porta a un aumento delle precipitazioni che, a sua volta, facilita il ripristino forestale con un'ulteriore riduzione degli incendi.
4. Due *circoli virtuosi economici* coinvolgono cambiamenti nel comportamento dei proprietari terrieri al fine di ridurre l'incidenza di incendi e di aumentare la conformità alla legislazione in materia di utilizzo del suolo. Primo, i mercati

richiedono sempre maggiori prestazioni sociali e ambientali da parte dei coltivatori e degli allevatori che, in risposta, promuovono campagne volte ad aumentare la legalità e le prestazioni socio-ambientali delle loro aziende agricole e allevamenti. Un'applicazione su un piano paritario e l'obiettivo comune di un maggiore accesso ai mercati di merci remunerative sta provocando un aumento degli investimenti nei campi della prevenzione degli incendi, del ripristino delle foreste delle zone riparali e della conformità ai requisiti richiesti per le riserve forestali su terreni privati. Secondo, i molti proprietari terrieri che sono riusciti con successo a mettere a dimora specie pirofite e a organizzare sistemi di gestione forestale e pascoli ottimizzati sui loro terreni tendono a utilizzare in misura minore il fuoco come strumento di gestione, investendo maggiori cifre nella prevenzione degli incendi. Questi proprietari terrieri, inoltre, incoraggeranno i loro vicini a prevenire gli incendi incidentali, si spera fino al momento in cui si raggiungerà un punto di svolta oltre il quale i produttori che utilizzano il fuoco diventeranno una sempre più esigua minoranza.

5. *Una gestione sostenibile del legname, che comprenda tecniche di taglio a "impatto ridotto", rappresenta un'importante alternativa economica all'agricoltura e all'allevamento dipendenti dalla deforestazione. Le tecniche a impatto ridotto consentono alle compagnie di lavorazione boschiva di tagliare il legname in maniera selettiva con solo un piccolo aumento della suscettibilità al fuoco della foresta, accrescendo la fattibilità di futuri raccolti ripetuti.*
6. *La mera applicazione delle politiche e dei programmi di utilizzo della terra esistenti all'interno dell'Amazzonia brasiliana e un'estensione di tali politiche e programmi agli altri paesi amazzonici potrebbero dimezzare la deforestazione. Per esempio, il Programma per le Aree protette dell'Amazzonia (ARPA) e i processi partecipatori di pianificazione regionale in preparazione per gli investimenti nelle infrastrutture hanno già contribuito, nei soli 2004 e 2005, alla creazione di 23 milioni di ettari di nuove riserve, con conseguente riduzione della disponibilità della terra sulla frontiera amazzonica brasiliana e del tasso di deforestazione.*
7. *Siamo ancora in tempo per ridurre il rischio di un diffuso degrado della foresta amazzonica e di un'accelerazione del riscaldamento globale che esso provocherebbe. È necessario cogliere tutte le opportunità per regolare l'espansione della frontiera amazzonica. Uno degli approcci più promettenti alla conservazione su larga scala delle foreste amazzoniche consiste nel compensare le nazioni tropicali per la loro riduzione delle emissioni di gas a effetto serra dalle foreste tropicali.*

Introduzione

La foresta amazzonica influenza la vita sulla Terra per mezzo di diversi processi, molti dei quali risultano ancora in parte sconosciuti. Questa foresta costituisce il più grande condizionatore d'aria del mondo, trasformando metà dell'energia solare totale che la raggiunge tramite l'evaporazione di grosse quantità di acqua dalle foglie e da altre superfici – circa 8.000 miliardi di tonnellate ogni anno (Salati e Vose, 1984). L'emissione nell'atmosfera di questo vapore acqueo risulta cruciale per la formazione di cumulonembi che, in cambio, sostengono la foresta con le precipitazioni. L'influsso dell'energia assorbita dalle foreste amazzoniche si estende in tutto il mondo per mezzo di collegamenti chiamati "teleconnessioni" climatiche. In base a un esperimento condotto su un modello, gli

agricoltori della cintura del grano nel Midwest degli Stati Uniti d'America e del granaio brasiliano nelle pianure centrali del Sud America possono scoprire che le loro stagioni delle piogge diminuiscono sempre più mano a mano che le foreste amazzoniche vengono convertite in pascoli, mentre potrebbero essere avvertiti altri cambiamenti nelle precipitazioni in luoghi remoti come l'India, il Pacifico occidentale e l'America Centrale (Werth e Avissar, 2002; Avissar *et al.*, 2005). I 7/8.000 miliardi di tonnellate d'acqua che ogni anno si riversano dalla foce del Rio delle Amazzoni nell'Oceano Atlantico rappresentano il 15 - 20% del deflusso fluviale totale mondiale di acque dolci negli oceani. I cambiamenti in questo enorme deflusso fluviale possono influenzare le gigantesche correnti oceaniche che spostano l'energia intorno al pianeta e che contribuiscono a creare il clima attuale? Alcuni scienziati credono di sì, ma noi semplicemente non conosciamo la risposta.

Anche le nostre vite sono collegate al benessere della foresta amazzonica come serbatoio di carbonio – elemento che costituisce la prima causa del riscaldamento globale poiché viene emesso nell'atmosfera sotto forma di CO₂, in combinazione con l'ossigeno, durante la combustione o la respirazione o, sotto forma di metano, in combinazione con l'idrogeno. Gli alberi dell'Amazzonia contengono 90-140 miliardi di tonnellate di carbonio (Soares *et al.*, 2006; Saatchi *et al.*, 2007), equivalenti a 9-14 anni delle emissioni di carbonio che attualmente vengono ogni anno rilasciate dall'uomo a livello globale – calcolate nel 2007 come ammontanti a circa 10 miliardi di tonnellate annue (Canadell *et al.*, 2007). Sarà veramente difficile rallentare il riscaldamento globale impedendo alle temperature medie mondiali di aumentare oltre i 2°C se le emissioni di carbonio dalle foreste tropicali di tutto il mondo, e in particolare dell'Amazzonia, non verranno drasticamente limitate nei prossimi anni (Gullison *et al.*, 2007). Nella sola parte brasiliana dell'Amazzonia questo carbonio viene rilasciato al ritmo di 0,2-0,3 miliardi di tonnellate all'anno, in conseguenza della conversione della foresta in pascoli e terreni agricoli (Houghton *et al.*, 2000; Fearnside, 1997); questa cifra arriva a raddoppiare quando le gravi siccità aumentano il rischio d'incendi (Nepstad *et al.*, 1999a; Alencar *et al.*, 2006). Sommando tutti i paesi amazzonici, le emissioni di carbonio da questa regione possono arrivare a 0,4-0,5 miliardi di tonnellate all'anno, senza considerare le emissioni derivanti dagli incendi nella foresta².

Oltre a rappresentare un gigante serbatoio di potenziali emissioni di gas a effetto serra, la foresta amazzonica ospita una specie su quattro/cinque di mammiferi, pesci, uccelli e alberi al mondo (Dirzo e Raven, 2003). Le popolazioni umane indigene della regione parlano più di 300 lingue e dialetti e alcuni di questi popoli non sono mai entrati in contatto con estranei.

Gli ecosistemi e la biodiversità dell'Amazzonia possono essere minacciati dal riscaldamento globale tramite una sostituzione, causata dal clima verso la fine del secolo, della foresta con una vegetazione semi-arida e simile alla savana, processo che è stato definito *dieback* (Cox *et al.*, 2000, 2004; Nobre *et al.*, 1991; Oyama e Nobre, 2003). Queste simulazioni clima-vegetazione non comprendono i cambiamenti di utilizzo del suolo o l'effetto sinergico di tali cambiamenti, uniti ai cambiamenti climatici regionali a breve termine sul regime d'incendi dell'Amazzonia. Nei prossimi venti anni, un'accelerazione delle attività economiche legate alla sostituzione e al danneggiamento della foresta potrebbe interagire con i mutamenti climatici regionali, portando alla sostituzione o al degrado di una larga parte della foresta amazzonica? Quale sarebbe l'impatto locale e

² Stime non pubblicate e descritte in un altro rapporto del WWF su allevamento e agricoltura in Amazzonia.

globale della sostituzione della foresta su larga scala a causa dell'agricoltura e dell'allevamento, combinati con il degrado forestale provocato da pratiche di taglio, incendi e siccità? Quale *trend* opposto sarebbe in grado di prevenire il *dieback* forestale che si profila minaccioso all'orizzonte? Tali questioni costituiscono il punto focale di questo rapporto, che prende in esame le evidenze dei "punti critici"³ nei sistemi ecologici e climatici dell'Amazzonia e descrive alcuni dei processi che potrebbero essere d'aiuto al mondo per evitare ciò.

Siccità, incendi e punto critico ecologico

Molte foreste amazzoniche risultano estremamente resistenti alla combustione. Se, al culmine della stagione arida, si versa del cherosene su foglie e rami secchi sul suolo forestale e si appicca fuoco, si noterà che l'incendio si spegne. Quest'alta resistenza alla combustione è ben conosciuta dai proprietari terrieri dell'Amazzonia, che appiccicano impunemente il fuoco ai loro campi e pascoli sapendo che le foreste circostanti agiranno come giganteschi rompifuoco, spegnendo gli incendi se dovessero sfuggire al controllo (Nepstad *et al.*, 1999b). Nel 1985 abbiamo saputo che, nel passato, la foresta amazzonica aveva ceduto al fuoco. Robert "Buck" Sanford e i suoi collaboratori hanno mostrato le età dei frammenti di carbone trovati nel suolo di diverse foreste amazzoniche, retrodatandoli a 6 000 anni fa (Sanford *et al.*, 1985). L'antropologa Betty Meggers ha ulteriormente ampliato queste scoperte con altri dati sul carbone e ulteriori prove indicanti che, negli ultimi due millenni, larghe zone della foresta amazzonica erano andate bruciate con un intervallo di 400-700 anni e che tali incendi sembravano essere associati a importanti episodi di siccità (Meggers, 1992). Oggigiorno, l'Amazzonia si trova ad affrontare siccità molto più gravi legate al clima e causate dalla trasformazione antropogenica della sua vegetazione.

Durante gli ultimi cinquant'anni, una delle maggiori trasformazioni ecologiche della regione amazzonica è stata la riduzione degli intervalli di tempo fra gli incendi e l'intervento umano, ambedue fattori che hanno trasformato il paesaggio dell'Amazzonia. Invece che con intervalli di secoli, alcune foreste prendono fuoco ogni 5-15 anni (Cochrane *et al.*, 1999; Alencar *et al.*, 2006). Inoltre, a ogni nuovo incendio la foresta diventa più esposta a ulteriori incendi. Il punto critico ecologico delle foreste amazzoniche viene raggiunto quando esse diventano così infiammabili che le periodiche e frequenti combustioni risultano quasi inevitabili. Per una migliore comprensione di questo punto critico ecologico è necessario conoscere il segreto della notevole resistenza al fuoco di queste foreste e in quale modo i disturbi ambientali possono indebolire tale resistenza. Per prendere fuoco, lo strato combustibile di una foresta amazzonica – le foglie morte e i rami secchi che giacciono al suolo – deve seccarsi a sufficienza da bruciare. Tale livello di essiccamento è molto raro nelle alte e mature foreste tropicali, a causa dell'alto tasso di umidità nell'aria. Durante la maggior parte delle notti dell'anno, anche dopo diverse

³ Il "punto critico" fa riferimento al momento in cui un *trend* o un modello di comportamento sociale oltrepassa una soglia, iniziando improvvisamente a diffondersi rapidamente (Grodzins, 1958; Schelling, 1971; Granovetter, 1978). Questo concetto è stato comunemente impiegato in epidemiologia per descrivere la diffusione di patologie, in base al concetto secondo cui piccoli mutamenti influiranno poco o nulla su un sistema fino a quando non verrà raggiunta una massa critica: a questo punto un piccolo cambiamento "pesa" sul sistema e si osserva un ampio effetto. Un simile concetto di resilienza è stato messo a punto per descrivere la capacità di un sistema di tollerare i disturbi senza collassare in uno stato qualitativamente differente, controllato da un diverso insieme di processi (Holling, 1973; Gunderson e Holling, 2002; Gunderson *et al.*, 2002).

settimane consecutive senza precipitazioni, il tasso d'umidità è così alto che, non appena si raffredda, l'aria è satura d'umidità e il sottile strato infiammabile assorbe parte di questa umidità. Fino a quando lo strato infiammabile riceve ombra da una fitta copertura di foglie, situata a 30-45 m dal suolo, è raro che si asciughi a sufficienza tanto da prendere fuoco (Uhl e Kauffman, 1990).

Proprio in questo consiste il problema. In ampie zone del bacino amazzonico, un taglio selettivo azzardato, la siccità e gli stessi incendi stanno assottigliando la copertura della foresta, consentendo sempre più alla luce solare di penetrare fino al sottile strato infiammabile, che si trova sul terreno della foresta. Gli alberi tagliati o estirpati dai tagliaboschi (Nepstad *et al.*, 1999a; Asner *et al.*, 2005), quelli morti per la siccità e per gli incendi lasciano aperture nella copertura di foglie, dalle quali i potenti raggi del sole equatoriale riescono a penetrare, seccando il sottile strato di combustibile sul terreno. L'aumento della quantità di luce solare all'interno della foresta favorisce l'attecchimento e la crescita di piante che necessitano di tale maggiore quantità di luce e che aumentano ulteriormente il grado di infiammabilità della foresta. Anche se si tratta di un fenomeno ancora raro nella foresta amazzonica, erbe altamente infiammabili, felci e bambù possono attecchire nel sottobosco, accrescendo la facilità a prendere fuoco della foresta stessa. Quando queste foreste danneggiate bruciano, si instaura un circolo vizioso per cui muore un numero maggiore di alberi, favorendo l'ulteriore invasione di erbe, felci e bambù (figura 1).

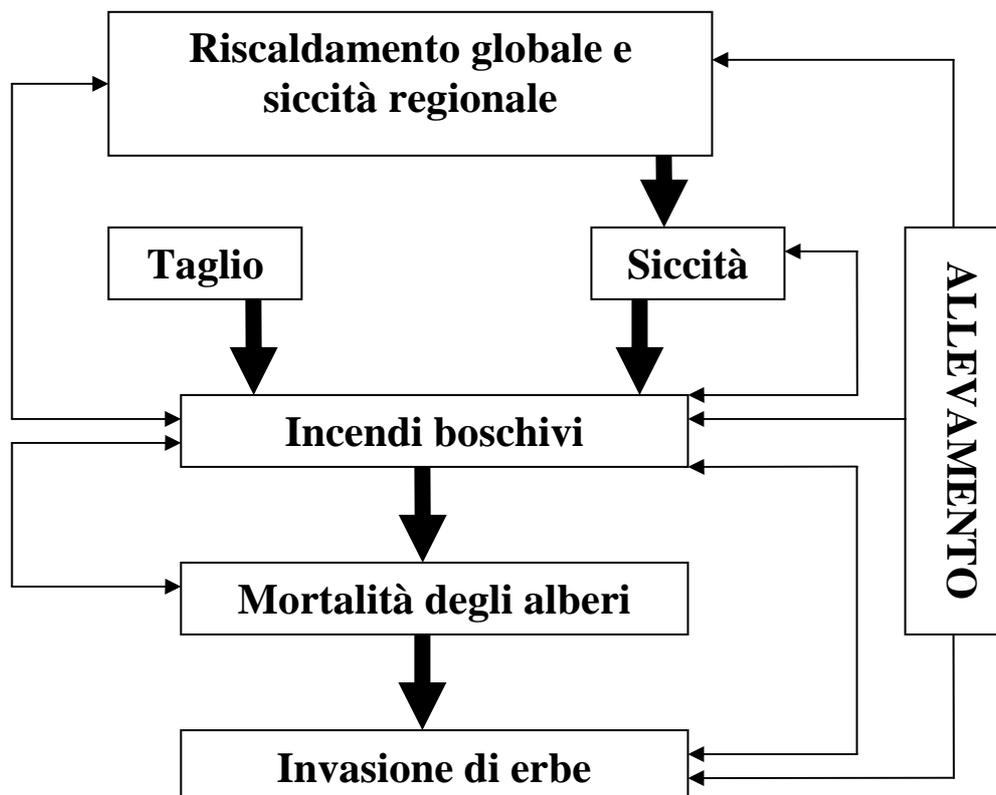


Figura 1: i processi e le interazioni che spingono le foreste amazzoniche oltre il loro punto critico ecologico. Tale punto critico viene raggiunto quando gli organismi predominanti della foresta – i suoi giganteschi alberi a chioma alta– muoiono per incendi, siccità o taglio, aprendo la strada a un ticket sensibile al fuoco di

vegetazione nel sottobosco. Anche se ciò accade ancora raramente in Amazonia, questo processo antropico di degrado della foresta può essere esacerbato dall'invasione di erbe, felci e bambù altamente infiammabili.

L'essiccamento su larga scala degli alberi causata dalla siccità costituisce un evento sorprendentemente raro, ma d'importanza critica per comprendere come piccoli cambiamenti nelle precipitazioni piovose possono spingere vaste aree della foresta amazzonica oltre i loro punti critici ecologici. Uno dei maggiori rompicapi ecologici delle foreste amazzoniche consiste nella loro capacità di superare gravi siccità stagionali senza segni visibili di stress da siccità. In verità, alcuni ricercatori parlano di evidenze periferiche di un "inverdimento" della copertura della foresta amazzonica a causa di una stagione prematuramente secca (Saleska *et al.*, 2007; Myneni *et al.*, 2006), anche se i rilevamenti sul campo di questo fenomeno risultano rari. Circa metà delle foreste amazzoniche è esposta a siccità stagionali, della durata di 3-5 mesi, quando le precipitazioni piovose mensili ammontano a soli 0-3 centimetri (Nepstad *et al.*, 1994, 2004)⁴. Lentamente, stiamo apprendendo come questi importanti ecosistemi abbiano sviluppato meccanismi di conservazione di una lussureggiante copertura di foglie verdi nei periodi di scarse precipitazioni piovose. L'adattamento più importante sembra essere il profondo (> 10 m) apparato radicale di molti alberi delle foreste amazzoniche, che consente loro di assorbire l'acqua contenuta in profondità nel terreno, in quanto l'umidità proveniente dalla superficie del terreno viene rilasciata gradualmente nei periodi di scarse precipitazioni (Nepstad *et al.*, 1994; 2004; 2007; Bruno *et al.*, 2006; Hodnett *et al.*, 1995). Durante la stagione secca, il 75% d'acqua rilasciata nell'atmosfera tramite la traspirazione delle foglie viene assorbita nel suolo a una profondità maggiore di 2 m (Nepstad *et al.*, 1994). Più recentemente, si è scoperto che gli alberi dell'Amazzonia assorbono consistenti quantitativi di umidità dalla rugiada che si forma sulle loro foglie durante la stagione secca (Cardinot, 2007).

La tolleranza alla siccità della foresta amazzonica presenta comunque i suoi limiti, e la comprensione di essi consente di realizzare quanto questi ecosistemi siano vicini al punto critico. Recentemente è stato condotto un esperimento, della durata di sette anni, per identificare il livello di stress da siccità oltre il quale le foreste amazzoniche iniziano a "decretere" a causa della mortalità degli alberi. Per cinque anni consecutivi le precipitazioni piovose su un ettaro di foresta sono state ridotte di un terzo utilizzando 5600 pannelli di plastica posizionati sul terreno (Nepstad *et al.*, 2002). Durante il terzo anno dell'esperimento, è stata raggiunta una soglia di siccità. I giganteschi alberi a chioma alta della foresta che costituiscono la *canopy*, hanno iniziato a morire non appena sono rimasti privi d'acqua nei superiori 11 m di terreno (Nepstad *et al.*, 2007). Nel giro di un solo anno sono morti gli alberi ammontanti al 10% del peso totale di tutti gli alberi della foresta interessata. Sembra che anche questi imponenti alberi giganteschi dalle profonde radici soccombano alla siccità e muoiano se non sussistono le condizioni perché essi assorbano dal suolo l'acqua sufficiente a consentire alle loro foglie di sostituire quella persa con la traspirazione. L'episodio de *El Niño* del 1997 -1998 potrebbe aver spinto circa un terzo degli alberi delle foreste amazzoniche vicino alla soglia di siccità che conduce alla morte⁵ (Nepstad *et al.*, 2004, figura 2), anche se sono disponibili poche misurazioni sul campo per conoscere esattamente l'entità del danno. Nell'Amazzonia centrale, in seguito a questa

⁴ Durante la stagione secca, le foreste amazzoniche perdono per evapotraspirazione (evaporazione più traspirazione) circa 12 cm di acqua al mese.

⁵ Gli episodi di *El Niño* sono associati a gravi siccità in Amazonia, Kalimantan e in molti altri luoghi dei tropici, mentre in altre regioni sono associati a un aumento delle precipitazioni piovose.

siccità, la mortalità degli alberi è aumentata del 50% (Williamson *et al.*, 2000). Nel corso dello stesso episodio de *El Niño*, le foreste pluviali tropicali del mondo hanno sperimentato alti livelli di mortalità degli alberi (Nakagawa *et al.*, 2000; van Nieuwstadt e Shiel, 2005).

La morte, causata dalla siccità, degli organismi predominanti delle foreste amazzoniche - gli alberi a chioma alta - può aumentare, negli anni successivi, la suscettibilità agli incendi (Ray *et al.*, 2005; Brando *et al.*, in stampa). Ciò risulta vero in quanto la corona di foglie sempreverdi degli alberi a chioma alta amazzonici, che protegge la foresta dal forte sole equatoriale come un gigantesco ombrellone, impiega molti anni a ricostituirsi. La copertura di una foresta amazzonica adulta, che forma una cupola a 45 m o più dal suolo, separa l'intenso calore della stessa copertura, dove viene intercettata la maggior parte dell'energia solare che ricade sulla foresta, dal buio e dall'umido del terreno molto più in basso. Ogni albero a chioma alta che muore, crea un "buco" nella copertura, tramite il quale i raggi solari penetrano nella foresta, riscaldandone l'interno. Il riscaldamento e il prosciugamento del manto rappresentano la causa maggiore dell'infiammabilità della foresta, aumentando enormemente quando tale copertura è diradata o vicina al suolo (Ray *et al.*, 2005).

Anche se nelle foreste centrali amazzoniche si verifica raramente la combustione da fulmini, i focolai d'incendio ad opera dell'uomo aumentano sempre più. Frequentemente gli incendi appiccati per bruciare le foreste cadute e prepararle alla coltivazione o al pascolo, o per migliorare il foraggio da pascolo, superano i confini previsti raggiungendo le foreste circostanti. Durante la grave siccità del 1998, circa 39 000 km² di foresta presero fuoco nell'Amazzonia brasiliana (Alencar *et al.*, 2006), corrispondenti a circa due volte l'area della foresta tagliata a raso nello stesso anno. Durante la grave siccità del 2005 (Aragão *et al.*, 2007), almeno 3 000 km² di foresta bruciarono nelle regioni di Madre de Dios, Pando e Acre, nel sudovest dell'Amazzonia (Brown *et al.*, 2006). Questi incendi vicini al suolo, che si propagano a bassa velocità, risultano distruttivi in maniera ingannevole, uccidendo dal 7 al 50% degli alberi adulti (>10 cm di diametro) (Alencar *et al.*, 2006; Balch *et al.*, presentato; Barlow e Peres, 2004; Cochrane e Schulze, 1999).

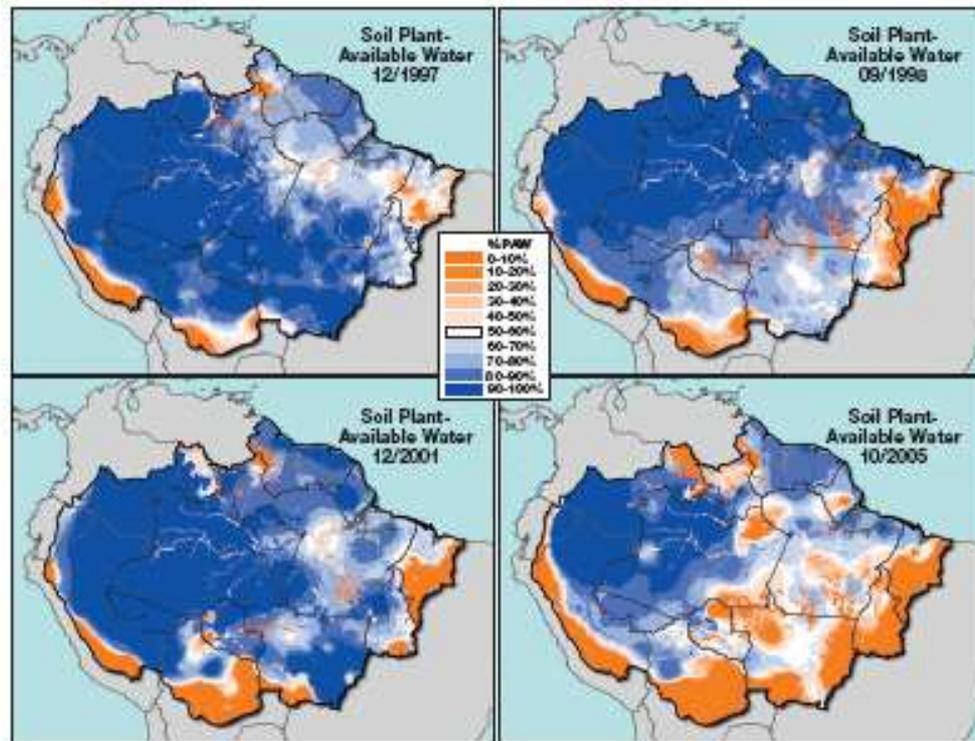


Figura 2: mappa dei livelli di umidità del suolo in Amazzonia durante quattro episodi di grave siccità. Questa mappa costituisce una stima della percentuale di PAW (Soil Plant Available Water) a 10 m di profondità, sulla base della somma delle precipitazioni piovose e dell'evotraspirazione, aggiornata da Nepstad *et al.*, 2004. Studi sul campo indicano che la mortalità degli alberi causata dalla siccità, sulla mappa in rosso chiaro/scuro, inizia quando il PAW scende al 30% del suo valore massimo (Nepstad *et al.*, 2007). L'esaurimento dell'umidità del suolo viene sovrastimato lungo le Ande a causa della mancanza di dati e di errori d'interpolazione.

Di conseguenza, un incendio della foresta può, in un circolo vizioso, incrementarne la sua sensibilità a ulteriori incendi che uccidono gli alberi, diradando la copertura e aumentando la penetrazione dei raggi solari fino al manto forestale (Nepstad *et al.*, 1995; 1999; 2001; Cochrane *et al.*, 1999). Il taglio selettivo, che può danneggiare fino al 50% della copertura (Uhl e Vieira, 1989) si trova al terzo posto fra le principali cause di disturbo che accrescono la suscettibilità della foresta agli incendi (Uhl e Kauffman, 1990; Holdsworth e Uhl, 1997; Ray *et al.*, 2005).

Le foreste spinte oltre il punto critico dalla mortalità degli alberi causata da siccità, incendi e/o taglio selettivo, risultano vulnerabili alla trasformazione in macchie o boscaglie infiammabili (Figura 1). Osservazioni sul campo, effettuate negli stati nord-orientale del Mato Grosso, sud-orientale e orientale del Parà e nei pressi di Santarém, hanno rilevato che tale vegetazione sensibile al fuoco è dominata da specie arboree invasive e germoglianti (come il *Solanum crinitum* e la *Vismia guianensis*) e, a volte, erbe (fra cui *Imperata brasiliensis*, il *Paspalum spp.*), bambù (*Guandu spp.*) e felci (come il *Pteridium aquilinum*) (Nepstad D., dati non pubblicati). Anche se rappresentano un evento ancora raro, le foreste invase da erbe possono risultare le più suscettibili al degrado, a causa della grande quantità di combustibile prodotto da molte erbe e per il loro effetto inibitore sulla rigenerazione arborea (Nepstad *et al.*, 1996). Nel sud-est asiatico, una singola specie di erba (*Imperata cylindrica*) attualmente domina circa 300 000 km² di terra che prima erano ricoperti da una foresta chiusa (McDonald, 2004).

La nostra comprensione del processo di degrado della foresta amazzonica presenta molte carenze. Le foreste che crescono su terreni poveri di nutrienti, come quelle che si formano su terreni sabbiosi, spesso sviluppano forti apparati radicali sul suolo minerale (Kauffman *et al.*, 1988) e possono risultare particolarmente vulnerabili alla mortalità arborea da incendi, in quanto una significativa parte di tale apparato radicale può essere uccisa dal fuoco. Il punto critico ecologico delle foreste amazzoniche varia da luogo a luogo, ma cominciano a intravedersi alcuni schemi generali. Le foreste hanno maggiore probabilità di degradarsi quando (a) gli alti livelli di mortalità arborea sono causati da siccità, incendi o taglio, (b) semi, o spore, di erbe, felci o bambù altamente sensibili al fuoco si diffondono in seguito alla mortalità degli alberi, (c) sono presenti fonti di combustione e (d) la foresta è soggetta a gravi siccità, stagionali o episodiche. La porzione di Amazzonia esposta a gravi siccità è ampia (Figura 2) e potrà aumentare in futuro a causa dei cambiamenti climatici antropogenici, della deforestazione ininterrotta e del cambiamento nell'utilizzo del suolo.

Deforestazione, fumi, riscaldamento globale e punto critico climatico

Per più di vent'anni, diversi team di scienziati hanno utilizzato modelli computerizzati per prevedere la relazione futura fra l'Amazzonia e il clima. Come cambierà il clima amazzonico mano a mano che i gas a effetto serra si accumuleranno nell'atmosfera, che le foreste verranno sostituite da pascoli o gli episodi di *El Niño* diventeranno più frequenti? Nessuno dei risultati di questi modelli risulta perfetto, ma essi forniscono pochi e coerenti messaggi. Sembra che l'Amazzonia stia andando verso un futuro più secco e caldo, con maggiori riduzioni delle precipitazioni piovose previste per la stagione secca e durante gli episodi di *El Niño*, quando la vegetazione risulta più sensibile a tali riduzioni. Anche la deforestazione inibisce le precipitazioni piovose e aumenta la temperatura, mentre i densi fumi possono prolungare la stagione secca per diverse settimane. In altre parole, gli andamenti futuri del clima amazzonico possono esacerbare pesantemente il degrado forestale, che ha già avuto inizio.

La sempre maggiore concentrazione nell'atmosfera di anidride carbonica, metano e altri gas a effetto serra è stata al centro di molti "esperimenti" con modelli computerizzati, condotti utilizzando modelli di circolazione globale (GCM - Global Circulation Models). Tali modelli sono in grado di simulare il clima futuro di tutto il mondo e la sua risposta al crescente forzante radiativo dell'atmosfera, associato all'accumulazione dei gas serra. Più del 60% dei 23 GCM, effettuati in scenari di accumulazione di gas a effetto serra, predice un sostanziale declino (>20%) delle precipitazioni piovose nell'Amazzonia orientale entro la fine del secolo (IPCC, 2007; Malhi *et al.*, in stampa; Figura 3). Questi modelli predicono un aumento delle precipitazioni piovose nell'Amazzonia occidentale, dove le piogge associate all'*uplifting* forzato dalle Ande possono aumentare a causa della maggiore umidità dell'aria associata al riscaldamento. Il solo riscaldamento globale probabilmente ridurrà le precipitazioni piovose nell'Amazzonia orientale.

Riconoscendo l'importanza del ruolo della vegetazione nel clima, alcuni gruppi di utilizzatori di questi modelli hanno unito "modelli dinamici di vegetazione" ai loro GCM, nel tentativo di simulare il modo in cui i cambiamenti climatici influenzeranno l'ubicazione dei diversi tipi di vegetazione e come questi cambiamenti nella vegetazione, a loro volta, influenzeranno il clima. Dall'Hadley Center del Regno Unito è arrivato uno dei risultati più sensazionali, che prevede entro fine secolo una sostituzione stabile e su larga scala della foresta pluviale amazzonica con una vegetazione semi-arida tipo savana e un

aumento della temperatura media di 8°C (Cox *et al.*, 2000; 2004). Altri gruppi di utilizzatori di questi modelli hanno scoperto prove simili di una nuova e stabile condizione vegetazione-clima in Amazzonia, con la maggior parte della regione orientale della foresta sostituita da una vegetazione resistente alla siccità (Salazar *et al.*, 2007; Oyama e Nobre, 2003; Botta e Foley, 2002). Diversi modelli accoppiati clima-vegetazione, tuttavia, non prevedono questo processo degenerativo su larga scala della foresta amazzonica (Friedlingstein *et al.*, 2006; Gullison *et al.*, 2007). Il riscaldamento globale può portare al decadimento di larghe aree della foresta amazzonica orientale e centrale, rinforzando un *trend* di essiccamento.

Diversi esperimenti con modelli climatici, che prevedono la completa sostituzione della foresta amazzonica con pascoli per il bestiame, prospettano ampie riduzioni delle precipitazioni piovose e un aumento delle temperature (Nobre *et al.*, 1991; Shukla e Nobre 1990; Lean e Warrilow, 1989). Due gruppi di utilizzatori di modelli climatici (Sampaio *et al.*, 2007; da Silva *et al.*, 2007) hanno simulato il clima futuro dell'Amazzonia utilizzando proiezioni su modelli di future deforestazioni (Soares *et al.*, 2006). Da Silva *et al.* (2007), utilizzando un sistema di modelli ad alta risoluzione, hanno scoperto che la deforestazione può esacerbare il *trend* verso la siccità dell'Amazzonia, probabile risultato del riscaldamento globale, specialmente durante gli episodi de *El Niño*, anche se la riduzione assoluta delle precipitazioni piovose è inferiore a quella prevista dai GCM. Anche Sampaio *et al.* (2007) hanno trovato prove di un'aumentata inibizione delle precipitazioni, causata dall'aumento della deforestazione. Se, invece dei pascoli, è la soia a costituire la spinta motrice verso la deforestazione, si può verificare una ben più alta riduzione delle precipitazioni piovose (Sampaio *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2007). La sola deforestazione inibisce le precipitazioni, in particolare quando riguarda il 30% o più della copertura forestale.

Inoltre, i modelli GCM prevedono che il riscaldamento globale porterà nella regione amazzonica un innalzamento della temperatura dell'aria, con la maggior parte delle proiezioni che si aggirano intorno a un aumento di 2°C della temperatura media dell'aria, ma con alcune che arrivano a prevederne uno di 8°C (IPCC, 2007). Temperature più alte causeranno un aumento della rapidità di evaporazione dell'acqua, esacerbando il *trend* della siccità associato alla diminuzione delle precipitazioni piovose. Probabilmente, con l'intensificazione del riscaldamento globale, in Amazzonia varierà anche la distribuzione di tali precipitazioni nel tempo. Il maggiore declino delle precipitazioni piovose avverrà presumibilmente nella stagione secca (Figura 3), quando la maggior parte della pioggia è causata dall'aria umida che sale dal suolo. Nella stagione secca la vegetazione risulta più sensibile alla mancanza d'acqua. La presenza di maggiore energia e umidità nell'atmosfera renderà gli eventi atmosferici estremi più comuni, con una maggiore frequenza di piogge torrenziali e forti venti (IPCC, 2007), che porteranno a un aumento delle perturbazioni in Amazzonia.

In un mondo che sta sperimentando rapidi cambiamenti, i modelli accoppiati clima-vegetazione, con l'importante panoramica da loro fornita sulla situazione climatica di fine secolo, costituiscono un esiguo strumento per comprendere il destino dell'Amazzonia. È d'importanza vitale, quindi, esaminare i cambiamenti del clima amazzonico già avviati, che potranno determinare l'aspetto delle foreste della regione nei prossimi 10-30 anni. Le occasionali siccità, che già si verificano in Amazzonia, possono costituire una spinta sufficiente verso una trasformazione in boscaglia delle foreste della regione.

Le attuali oscillazioni del clima in Amazzonia vengono spesso associate ai cambiamenti della temperatura della superficie marina. La temperatura della superficie oceanica esercita la sua influenza sulla determinazione dei luoghi del pianeta dove l'aria calda e umida si innalzerà, provocando precipitazioni piovose, e di quelli dove l'aria calda e secca scenderà inibendo le piogge. Le precipitazioni piovose tendono a diminuire nell'Amazzonia orientale, dove la temperatura della superficie del mare aumenta lungo la costa del Pacifico del Sud America settentrionale durante gli episodi de *El Niño* (Marengo *et al.*, in stampa). Il riscaldamento della superficie marina fra l'Africa occidentale e il Golfo del Messico (chiamato *Northern Tropical Atlantic Anomaly* - NTAA) è associato anche a siccità nel bacino amazzonico, ma esercita la sua maggiore influenza nell'Amazzonia occidentale (Marengo *et al.*, in stampa). Alcuni climatologi credono che queste anomalie della temperatura della superficie marina diverranno più frequenti mano a mano che i gas a effetto serra si accumuleranno nell'atmosfera (Timmerman *et al.*, 1999; Hansen *et al.*, 2006; Trenbarth e Hoar, 1997).

Le analisi e la rappresentazione con modelli del clima regionale hanno anche trovato evidenze di più localizzati cambiamenti, nelle precipitazioni piovose, associati alla deforestazione, fra cui prove del fatto che all'inizio, quando i disboscamenti interessano piccole aree del panorama forestale, si verifica un aumento delle precipitazioni, seguito poi da una diminuzione, mano a mano che si ampliano le zone di deforestazione (Silva Dias *et al.*, 2002; da Silva e Avissar, 2007).

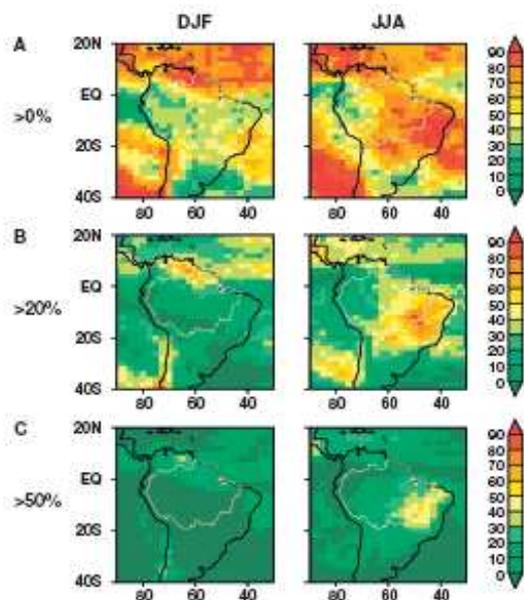


Figura 3: molti modelli climatici prevedono un significativo essiccamento (>20%) dell'Amazzonia orientale entro la fine del secolo. Queste mappe riassumono i risultati di 23 modelli di circolazione globale utilizzati per lo scenario moderato dell'IPCC di accumulo di gas a effetto serra per la fine del secolo. La barra a destra fornisce lo schema dei colori per la percentuale di tali modelli, che prevedono un aumento della siccità in Amazzonia entro la fine del secolo, compresi: un qualsiasi aumento della siccità (A), un aumento della siccità di almeno il 20% (B), e un aumento della siccità di almeno il 50% (C). Le previsioni riguardano la stagione secca nel nord dell'Amazzonia (dicembre, gennaio, febbraio; a sinistra) e nel sud dell'Amazzonia (giugno, luglio, agosto; a destra). (Malhi *et al.*, in stampa)

Ai fini della nostra comprensione del potenziale insito nel raggiungimento del punto critico climatico, una delle più importanti scoperte è costituita dall'inibizione delle precipitazioni piovose da parte delle nuvole (Andreae *et al.*, 2004). Quando le particelle di aerosol, provenienti dalla combustione delle biomasse, acquistano densità nell'atmosfera, si verifica un eccesso dei nuclei di condensazione e le singole gocce d'acqua non diventano pesanti a sufficienza da ricadere sulla terra sotto forma di pioggia. La comunità scientifica non conosce ancora l'importanza di questo fenomeno nell'influenzare la quantità totale di precipitazioni, ma esiste un'evidenza aneddotica che questa inibizione delle precipitazioni piovose stia già esercitando il suo effetto sull'attività di agricoltori e allevatori. I mandriani

e gli agricoltori della regione del corso superiore dello Xingu, nel Mato Grosso, affermano che, quando la densità dei fiumi è alta, la stagione delle piogge inizia più tardi nel corso dell'anno (J. Carter, comunicazione personale). I fiumi densi possono inibire l'inizio della stagione delle piogge per diverse settimane.

Le nuove pressioni per la deforestazione possono accelerare il processo degenerativo (*dieback*)

Diversi *trend* nei mercati agricolo, zootecnico e commerciale possono accelerare la velocità di deforestazione in Amazzonia e, con esso, la probabilità di un processo degenerativo forestale a breve termine. Primo, in vaste aree dell'Amazzonia meridionale e orientale è stata sradicata l'afra epizootica, cosa che ha aperto all'industria zootecnica della regione il mercato delle esportazioni dall'Amazzonia, spesso con prezzi superiori (Kaimowitz *et al.*, 2004; Nepstad *et al.*, 2006a; Arima *et al.*, 2006). L'America Latina sta lottando per sradicare totalmente questa patologia nella regione (PAHO 2004), rafforzando così ulteriormente l'allevamento. Secondo, la crescente richiesta internazionale di merci agroindustriali, come la soia, è in contrasto con la scarsità di terreni adatti a un'espansione agroindustriale negli USA, in Europa occidentale, Cina e in molti altri paesi agricoli (Nepstad e Sticker, in stampa). Di conseguenza, la maggior parte del recente e improvviso aumento mondiale nell'espansione delle terre coltivate sta avendo luogo nelle regioni brasiliane dell'Amazzonia e del Cerrado, dove più di 1 000 000 km² di terreno adatto a questo tipo di espansione è ancora disponibile ai fini di un incremento della produzione meccanizzata (Shean, 2004; Nepstad *et al.*, 2006a. Figura 4). Terzo, il crescente prezzo del petrolio ha innescato nuove iniziative nelle politiche nazionali di Stati Uniti, Unione Europea e Brasile, che guardano all'espansione dei biocarburanti come possibili sostituti di benzina e gasolio (Yacobucci e Schnepf, 2007). L'etanolo dalla canna da zucchero brasiliana soddisferà la maggior parte della crescente richiesta globale di etanolo, in quanto costituisce una delle forme di etanolo più efficienti ed economiche al mondo (Pimentel e Patzek, 2005; World Watch, 2006; Xavier, 2007) e possiede il maggiore potenziale per una produzione allargata. Anche se la maggior parte dell'espansione della produzione di canna da zucchero avrà luogo nel Brasile centrale e meridionale, ciò influenzerà indirettamente l'Amazzonia, dislocando la produzione di soia e l'allevamento di bestiame. Inoltre, i programmi di coltivazione, soprattutto in Brasile (Cattaneo, in stampa), hanno prodotto una varietà di soia e di altre piante resistenti alle alte temperature e ai tassi d'umidità della regione amazzonica. La combinazione di questi e altri fattori ha portato a crescenti pressioni economiche per la conversione delle foreste amazzoniche in terreni da pascolo e coltivazione, a un'espansione delle fonti di combustione e all'aumento di piante invasive, il che ha reso ancora più vulnerabili al fuoco le foreste della regione. Inoltre, ciò porterà a un aumento della rapidità, rispetto ai *trend* attuali, d'inibizione delle precipitazioni piovose a causa dei fiumi e a cambiamenti nell'utilizzo del suolo dovuti alla deforestazione.

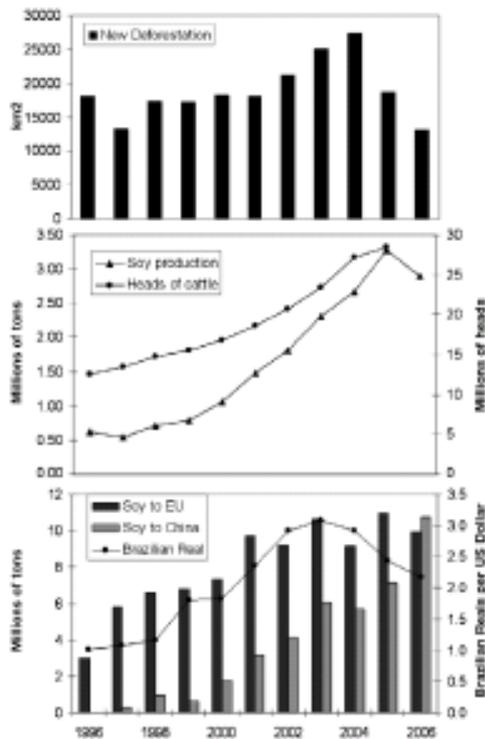


Figura 4: recenti *trend* di deforestazione nell'Amazzonia brasiliana, espansione del patrimonio bovino amazzonico, produzione di soia amazzonica, valore della valuta brasiliana (Real) in confronto al dollaro USA ed esportazioni di soia brasiliana nell'Unione Europea e in Cina. L'aumentata richiesta internazionale di soia e altre materie prime agricole sta favorendo il sorgere di nuovi terreni coltivati in Amazzonia, spostando l'allevamento del bestiame nel cuore della regione. Nuove richieste di biocarburanti possono esacerbare questo *trend*. Il recente declino della deforestazione è stato associato alla diminuzione dei prezzi della soia e del bestiame e con il rafforzamento del Real brasiliano, ma può essere stato causato anche dalla creazione di nuove aree protette per mezzo del programma ARPA e da un maggiore investimento governativo nel rafforzamento della normativa in materia di suolo (aggiornato da Nepstad *et al.*, 2006). Stime iniziali della deforestazione nel 2007 indicano un incremento della stessa, forse come riflesso di un aumento dei prezzi di soia e carne di manzo.

Un altro importante cambiamento, che sta avvenendo in Amazzonia e che favorirà l'accelerazione della deforestazione, anche di quella nel cuore della foresta, consiste nell'asfaltatura e nella costruzione di autostrade in regioni precedentemente conservate, in maniera "passiva", a causa della loro posizione remota (Nepstad *et al.*, 2000; 2001; 2002; Alves *et al.*, 2003; Figura 5). Gli investimenti nelle autostrade abbassano i costi legati al trasporto di prodotti agricoli al confine e di merci ai mercati, aumentando, di conseguenza, la redditività delle produzioni agricole e zootecniche rispondenti alle esigenze del mercato. Anche le *hidrovias* (vie d'acqua) vengono messe in discussione, in particolare quelle lungo il fiume Madeira, dove due nuovi bacini idroelettrici verranno impiegati per facilitare il trasporto via chiatte in Bolivia e per generare energia. Con l'asfaltatura dell'autostrada inter-oceanica da Assis (Brasile) a Cuzco, l'imminente asfaltatura dell'autostrada BR319 da Manaus a Porto Velho e della BR163 da Santarem a Cuiabà, il costo del trasporto diminuirà drasticamente nelle regioni dell'Amazzonia, aumentando la probabilità di un punto critico economico.

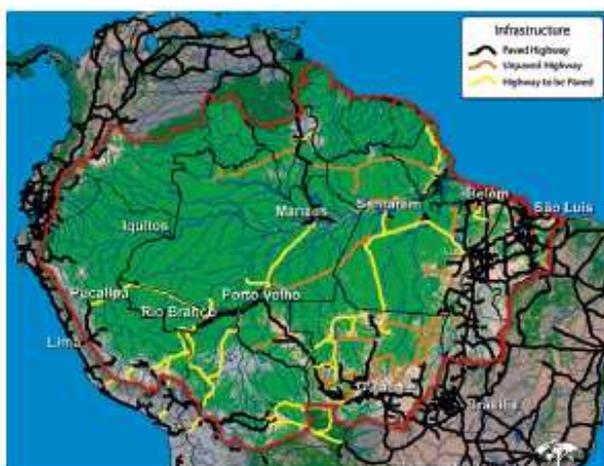


Figura 5: le autostrade amazzoniche. La regione centrale dell'Amazzonia diventerà presto accessibile grazie ad autostrade praticabili tutto l'anno (giallo) non appena verranno implementati i piani di asfaltatura. Questi investimenti nel settore dei trasporti abbassano i costi della produzione zootecnica e agricola, favorendo probabilmente la deforestazione.

Il *dieback* si sta rapidamente avvicinando?

Diverse forze spingono l'Amazzonia verso un *dieback* a breve termine. Le squadre di taglio estendono le loro reti stradali sempre più nel cuore della foresta amazzonica, tagliando solo una parte del legname forestale, ma assottigliando enormemente il tetto della foresta, con danni collaterali agli alberi che rimangono. Ai tagliatori seguono gli allevatori di bestiame, che mandano le loro squadre armate di motoseghe ad abbattere gli alberi in preparazione della formazione di pascoli, che verranno poi capitalizzati vendendo la terra ai coltivatori di soia. Con i semi delle erbe da pascolo africane arrivano anche i semi *hitchhiking* [N.d.T.: *l'hitchhiking* è l'incremento della frequenza di un allele a causa della selezione positiva ad un *locus* associato] di erbe pericolose, che si diffondono nel paesaggio, invadendo, a volte, le foreste danneggiate dalle pratiche di taglio e dagli incendi. Le gravi siccità periodiche, associate agli episodi de *El Niño* e al *Northern Tropical Atlantic Anomaly* (NTAA), inaridiscono grosse porzioni delle foreste della regione, aumentando la loro suscettibilità agli incendi, che sfuggono dai campi degli agricoltori e dai pascoli degli allevatori e danneggiano ulteriormente la foresta causando la mortalità degli alberi. Le dense cortine di fumo possono prolungare la stagione secca per altre settimane, accrescendo la parte di foresta che viene bruciata dagli incendi sfuggiti, come spiegato precedentemente.

Quanto tempo ci rimane per prevenire un *dieback* su larga scala in Amazzonia? Quanto tempo impiegheranno i processi sinergici di degrado forestale, inibizione delle precipitazioni piovose e deforestazione a dimezzare la foresta?

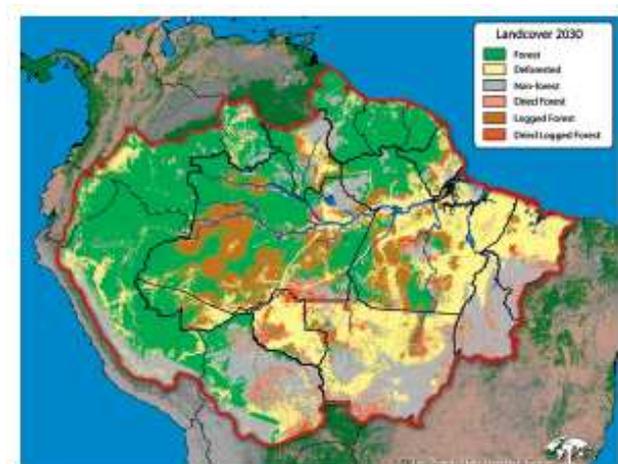


Figura 6: una foresta in corsa verso un punto critico ecologico e climatico? Mappa dell'Amazzonia nel 2030, che mostra le foreste danneggiate da siccità, taglio e disboscamento. Questa mappa presume che nel futuro le velocità di deforestazione del periodo 1997-2003 continuino inalterate e che si ripetano le condizioni climatiche degli ultimi 10 anni. Vedere il testo per ulteriori dettagli.

Questo rapporto presenta una valutazione preliminare delle probabilità di un *dieback* a breve termine della foresta e della sue conseguenze ecologiche (Figura 6)⁶. Tale valutazione è di tipo conservativo, in quanto assume che le velocità di deforestazione seguiranno quelle osservate nel periodo 1998-2003 (Soares *et al.*, 2006), che nel futuro si ripetano le condizioni climatiche degli ultimi 10 anni e non comprende l'inibizione delle

⁶ Si assume in uno scenario "Business-as-usual" di deforestazione, come stimato da Soares *et al.* (2006), che le condizioni climatiche dell'Amazzonia del decennio da gennaio 1996 a dicembre 2005 (aggiornato da Nepstad *et al.*, 2004) vengono replicate nel futuro, in cui la soglia della mortalità arborea viene superata quando l'acqua disponibile alla pianta al suolo (PAW) scende al di sotto del 30% del suo valore massimo fino a una profondità di 10 m (utilizzando la mappa del PAW massimo presentata in Nepstad *et al.*, 2004, e la soglia di mortalità di Nepstad *et al.*, 2007) e in cui l'attività di taglio si estende in Amazzonia secondo quanto descritto nel modello economico basato sull'affitto di Merry *et al.* (in revisione).

precipitazioni piovose ad opera dei fumi ne' quella causata dalla deforestazione. In questa valutazione non sono stati considerati gli incendi, anche se probabilmente una vasta porzione delle foreste danneggiate da siccità e/o taglio e anche le foreste che non risultano danneggiate, ha subito incendi del sottobosco. In base a questi assunti, il 31% della foresta amazzonica a chioma alta verrà distrutto (attualmente fino al 17%) e il 24% ⁷ verrà danneggiato da siccità o taglio entro il 2030. Assumendo che le precipitazioni diminuiscano del 10% in futuro, un ulteriore 4% delle foreste verrà danneggiato dalla siccità.

Supponendo che l'emissione di carbonio della deforestazione avvenga secondo le modalità descritte in Soares *et al.* (2006), che il taglio selettivo rilasci nell'atmosfera il 15% del carbonio stoccato nella foresta (Asner *et al.*, 2005), che i danni legati alla siccità causino una riduzione del 10% della biomassa forestale (Nepstad *et al.*, 2007) e che gli incendi riguardino il 20% delle foreste danneggiate da siccità o attività di taglio, rilasciando nell'atmosfera un ulteriore 20% del carbonio della foresta, si ha che, nei primi periodi di un *dieback* della foresta amazzonica, verranno emessi nell'atmosfera 15-26 dei 90-140 miliardi di tonnellate di carbonio contenuto negli alberi della foresta amazzonica. In altre parole, i cambiamenti che oggi stanno avvenendo in Amazzonia potrebbero vanificare molti dei passi avanti compiuti nella riduzione delle emissioni di gas serra e negoziati nell'ambito del Protocollo di Kyoto che, se pienamente implementato, nel periodo 2008-2012 porterà a una riduzione delle emissioni di carbonio pari a 2 miliardi di tonnellate.

Questo *dieback* forestale a breve termine comporterà grossi costi per la società amazzonica. I soli incendi causeranno la morte di centinaia di abitanti della regione e faranno ammalare decine di migliaia di persone di patologie bronchiali. Gli spostamenti e le trasmissioni d'energia elettrica saranno interrotti e molti investimenti rurali in recinzioni per il pascolo del bestiame, frutteti e gestione del legname forestale andranno persi.

I costi degli incendi nell'Amazzonia brasiliana potranno risultare altissimi. Nel 1998, gli impatti di tali incendi su salute, agricoltura, attività forestali ed emissioni di carbonio sono stati quantificati in 5 miliardi di dollari U.S.A. (Mendoça *et al.*, 2003). Siccità più frequenti e intense porteranno a una moria di pesci e a bassi livelli dei fiumi, tagliando fuori le comunità fluviali dai vicini mercati e dai servizi sanitari e didattici. (Marengo *et al.*, in stampa).

Molte delle perdite associate a un processo di *dieback* forestale risultano di difficile quantificazione. Entro il 2050, quattro ecoregioni, fra cui la foresta di Maranhão babaçu, la foresta secca di Marañon e la foresta secca di Tumbes/Piura, verranno ridotte a meno del 15% delle loro dimensioni attuali (Soares *et al.*, 2006). Le foreste di nubi della Bolivia e del Perù potrebbero scomparire se i cambiamenti in corso nel clima regionale inibiranno le precipitazioni piovose e la formazione di nubi alte, condizioni necessarie per l'esistenza dell'ecosistema; questo processo ha già portato all'estinzione del rospo dorato (*Bufo periglenes*) nella cordigliera dell'America centrale (Lawton *et al.*, 2001). Il solo riscaldamento globale potrebbe spostare verso l'alto le fasce climatiche delle Ande orientali, a una velocità maggiore di quella con cui le specie vegetali potrebbero migrare (Bush *et al.*, 2004). Inoltre, molte specie animali verrebbero coinvolte negativamente da questa distruzione di habitat. Entro il 2050, solo un decimo dell'habitat dell'uistiti

⁷ Non esistono stime, calcolate lungo tutto il bacino, dell'area totale di foresta danneggiata da pratiche di taglio, incendi e siccità.

argentato (*Mico argentatus*) continuerà a essere coperto da foreste e un quarto di tutti i mammiferi perderanno almeno il 40% dei loro territori a causa della deforestazione (Soares *et al.*, 2007).

Ancora una volta, questo scenario potrebbe risultare conservativo. Se la deforestazione dovesse aumentare a causa dell'innalzamento dei prezzi dei biocarburanti e delle materie prime agricole, o se le precipitazioni piovose dovessero subire una forte inibizione a causa della deforestazione o dei fumi, la velocità di *dieback* potrebbe facilmente raddoppiare. Piccoli aumenti nei livelli di siccità o deforestazione potrebbero accelerare la distruzione e il degrado della foresta, fino al punto tale da oltrepassare la soglia del 50% nei prossimi 15 anni.

Evitare un punto critico dell'Amazzonia: processi chiave

Diversi e importanti processi e rapporti potrebbero contrastare le forze che spingono l'Amazzonia verso uno scenario di *dieback*, fornendo alcuni elementi per una coraggiosa strategia di conservazione dell'Amazzonia.

→ **In assenza di incendi, si assiste a una rapida ripresa di molte foreste.** Entro 15 anni, la maggior parte delle terre degradate dell'Amazzonia, se protetta dal fuoco, potrebbe tornare allo stato di foresta chiusa (Uhl *et al.*, 1988; Nepstad *et al.*, 1991; Jipp *et al.*, 1998). La ricrescita forestale procede a una velocità determinata in larga parte dall'intensità dell'utilizzo precedente l'abbandono (Uhl *et al.*, 1988; Zarin *et al.*, 2001; Davidson *et al.*, 2007). Generalmente, i pascoli abbandonati, che furono impiantati su suoli mai arati, vengono infestati con maggiore rapidità da alberi cedui e liane, che, entro 10-15 anni, si evolvono in foreste chiuse secondarie. Ogni anno di ripresa che trascorre senza incendi l'altezza media del tetto forestale in ricrescita è maggiore, la sua vulnerabilità al fuoco (Ray *et al.*, 2005; Holdsworth e Uhl, 1997) e la quantità di vapore che genera nubi e precipitazioni piovose immesso nell'atmosfera aumenta (Jipp *et al.*, 1998).

→ **Mano a mano che i proprietari terrieri contrari agli incendi diventano più numerosi, quelli che invece basano la loro attività sugli incendi potrebbero seguire l'esempio.** Mano a mano che sulle loro proprietà aumentano gli investimenti "sensibili al fuoco", come alberi da frutto, alberi del soprassuolo, sistemi di gestione del legname forestale e foraggio migliorato, i proprietari terrieri evitano di utilizzare gli incendi come strumento per la gestione della terra, investendo maggiormente nella prevenzione di incendi accidentali (Nepstad *et al.*, 2001; Bowman *et al.*, presentato). Con l'aumentare del numero dei proprietari terrieri contrari agli incendi in un paesaggio, è possibile arrivare a un punto di svolta, oltre il quale questi proprietari prevalgono, nella prevenzione degli incendi, sui loro vicini che, invece, li utilizzano. Tale cambiamento nel comportamento dei proprietari terrieri - se, di fatto, si verifica - può giocare un ruolo chiave nella prevenzione del degrado forestale dovuto agli incendi.

→ **La crescente richiesta di comportamenti più attenti all'ambiente, evidente fra gli acquirenti e i finanziatori di materie prime agricole, può spingere i settori agro-industriale e zootecnico dell'Amazzonia verso una maggiore conformità alle normative e verso l'adozione di migliori pratiche agricole.** Un secondo cambiamento nel comportamento dei proprietari terrieri può verificarsi quando un numero sempre maggiore di produttori guarda a una sana gestione del suolo, comprensiva di un utilizzo

sensato degli incendi e della conformità alla legislazione in materia ambientale, come condizione necessaria per accedere al mercato delle materie prime e per ottenere crediti e finanziamenti. I coltivatori di soia del Mato Grosso si trovano attualmente nel mezzo di tale cambiamento, in quanto sta iniziando il secondo anno di una moratoria a loro imposta dall' *Associação Brasileiro de Indústrias de Óleos Vegetais* (Associazione brasiliana dell'industria degli oli vegetali - ABIOVE). Questa moratoria di due anni, relativa all'acquisto di soia piantata su terreni della foresta amazzonica recentemente disboscata, è stata promossa da una campagna contro la soia amazzonica avviata dall'organizzazione ambientalista Greenpeace (Greenpeace 2006). Attualmente, i produttori di soia e le loro organizzazioni stanno studiando e mettendo a punto dei sistemi di certificazione della sanità ambientale delle loro aziende agricole. Per esempio, la *Roundtable for Responsible Soy* (Tavola rotonda per la soia responsabile - RTRS), avviata dal WWF - *World Wide Fund for Nature* - nel 2004, è attualmente parte di un processo internazionale, che vede coinvolti diversi *stakeholder*, per la definizione dei criteri d'identificazione e certificazione dei produttori di soia responsabili. La RTRS include fra i suoi membri gli acquirenti del 20% del raccolto annuale mondiale di soia, che si sono tutti impegnati ad acquistare soia certificata RTRS. Su scala minore, il *Cadastro de Compromisso Socioambiental* (Catasto della responsabilità socio-ambientale - CCS), lanciato da due ONG (*Aliança da Terra* - AT - e *Instituto de Pesquisa Ambiental de Amazonia* - IPAM), ha coinvolto 75 fra allevatori e agricoltori, le cui proprietà ammontano in totale a 1,5 milioni di ettari (Arini, 2007). L'ammissione al *Cadastro* impegna i proprietari terrieri a implementare, sulle loro proprietà, sane politiche di gestione terriera e di rapporti lavorativi, che vengono rese note ai potenziali acquirenti tramite un sito web. Nel 2006 e nel 2007, due catene di supermercati e il più grosso allevatore di polli del Brasile si sono rivolti ad AT e IPAM per acquistare soia e carne di manzo prodotte su proprietà CCS. Nel contesto di questo tipo di sistemi di certificazione, i proprietari terrieri hanno concordato di adottare tecniche di prevenzione degli incendi sui loro confini forestali, come i rompifuoco, per conformarsi ai requisiti di riserva forestale privata della legislazione federale e per preservare le loro zone riparali.

→ **Il ripristino forestale e la messa a dimora di alberi su terreni degradati può ristabilire la traspirazione e mettere al riparo il clima regionale da eventi climatici estremi.** Il vapore acqueo prodotto dalle foreste dell'Amazzonia orientale risulta vitale per il mantenimento del *downwind* dei sistemi di precipitazioni piovose nell'Amazzonia centrale e occidentale (Marengo *et al.*, in stampa; da Silva *et al.*, in stampa). Un modo per proteggere l'Amazzonia dagli eventi climatici estremi consiste nel ripristinare la traspirazione della foresta sui vasti paesaggi deforestati lungo l'autostrada Belém-Brasília nel Pará e nel Maranhão orientali, e lungo l'autostrada PA150 nel Pará centrale. Il ripristino della traspirazione di ampi paesaggi - ottenuto tramite la ricrescita forestale e la messa a dimora di alberi - insieme alla riduzione degli incendi, può ridurre l'inibizione delle precipitazioni provocata dalla sostituzione della foresta originaria con pascoli e campi di soia. Poiché il ripristino della foresta fa aumentare le precipitazioni piovose, è possibile instaurare un circolo virtuoso per un più rapido ripristino forestale.

→ **La gestione sostenibile del legname.** È possibile gestire in maniera produttiva le foreste amazzoniche per una produzione sostenibile di legname e contemporaneamente ridurre significativamente l'impatto negativo del taglio delle foreste (Holmes *et al.*, 2002; Barreto *et al.*, 1998). Tecniche di taglio a "impatto ridotto", fra cui il taglio delle liane precedente il raccolto, un'attenta mappatura dei sentieri di esbosco, l'abbattimento

direzionale degli alberi e altre pratiche consentono profitti equi alle compagnie di taglio (Holmes *et al.*, 2002; Barreto *et al.*, 1998), riducendo di molto i danni al tetto forestale che aumentano la suscettibilità al fuoco della foresta (Holdsworth e Uhl, 1997). La conservazione dell'Amazzonia dipenderà dallo sfruttamento del valore economico del legname della regione, allo scopo di favorire una transizione verso un'economia basata sulla foresta e contraria al fuoco (Nepstad *et al.*, 2006d).

→ **Una pianificazione regionale volta a ridurre gli impatti negativi dei progetti per infrastrutture di trasporto.** Fra gennaio 2004 e la fine del 2006, 23 milioni di ettari di terreno nell'Amazzonia brasiliana sono stati dichiarati riserve forestali (Campos e Nepstad, 2006). Questo successo storico nel campo della conservazione della foresta tropicale eviterà l'emissione nell'atmosfera di circa 1 miliardo di tonnellate di carbonio entro il 2015, aumentando la scarsità di foresta disponibile per l'allevamento di bestiame e la coltivazione di soia (Nepstad *et al.*, 2006c; Soares *et al.*, 2006). Questo successo è stato possibile in parte grazie al programma del *Brazil's Amazon Region Protected Area* (ARPA) che, in cooperazione con Banca Mondiale, *Global Environment Facility*, governo tedesco e WWF, ha fissato l'obiettivo di espandere la rete delle aree protette al 12% del territorio dell'Amazzonia brasiliana. Ma è stato reso possibile anche grazie a un ampio processo di pianificazione regionale, che ha coinvolto centinaia di organizzazioni di agricoltori, compagnie di taglio, gruppi ambientalisti e governo. Questo processo di pianificazione regionale ha avuto inizio, prima dell'asfaltatura dell'autostrada BR-163 Santarém-Cuiabá, nell'ambito del programma di sviluppo regionale del movimento sociale dell'autostrada Transamazzonica, che ha creato un'ampia base di supporto politico per l'istituzione di nuove aree protette su una frontiera agricola attiva (Campos e Nepstad, 2006).

→ **REDD: un nuovo e potente meccanismo per ricompensare i paesi tropicali che proteggono le loro foreste?** Il mondo è pronto a pagare affinché i paesi tropicali diminuiscano le loro emissioni di gas a effetto serra causati dalla deforestazione e dal degrado forestale? Ci sono motivi per credere che nei prossimi anni si svilupperà un nuovo clima politico internazionale. Nello UNFCCC si stanno facendo rapidamente strada i negoziati per creare un meccanismo di compensazione nazionale dei paesi tropicali che riescono a ridurre le loro emissioni causate da deforestazione e degrado forestale (REDD). In Brasile, un patto per l'azzeramento graduale della deforestazione ha riscosso vasto successo nel congresso nazionale, fra i governi dei diversi stati e nella comunità ambientalista. La *Aliança de Povos da Floresta* (Alleanza dei popoli della foresta) ha presentato il suo appoggio al REDD con una serie di condizioni, fra cui la retribuzione per i popoli della foresta per il loro ruolo come guardiani della foresta - le foreste situate nelle riserve indigene sono protette esattamente come quelle dei parchi e delle riserve biologiche, sulla base di analisi satellitari di deforestazione (Nepstad *et al.*, 2006a). Un sano meccanismo di offerta di incentivi economici per la conservazione della foresta tropicale potrebbe contribuire grandemente a prevenire il raggiungimento del punto critico ecologico e climatico dell'Amazzonia.

Conclusioni

Trend sinergici nei campi dell'economia, della vegetazione e del clima in Amazzonia potrebbero portare, nei prossimi 15-25 anni, alla sostituzione o al danneggiamento di più della metà delle foreste chiuse del bacino del Rio delle Amazzoni, vanificando molti dei successi attualmente in corso sulla strada della riduzione delle emissioni globali

nell'atmosfera di gas serra. A contrastare questi *trend* stanno emergendo dei cambiamenti nel comportamento dei proprietari terrieri, i recenti successi nell'istituzione di ampie zone di aree protette sulle frontiere agricole attive, importanti *trend* del mercato che favoriscono la gestione forestale e un possibile nuovo meccanismo internazionale per ricompensare le nazioni tropicali per i loro progressi nella conservazione della foresta, che potrebbero ridurre la probabilità di un *dieback* su larga scala del complesso forestale amazzonico. Tuttavia, sul lungo termine, evitare questo scenario può dipendere dalla riduzione mondiale delle emissioni di gas a effetto serra, condizione sufficiente per evitare l'innalzamento delle temperature mondiali di più di 2°C.

Bibliografia

- Alencar, A., D. C. Nepstad, and M. d. C. Vera Diaz (2006)**, Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO Years: Area burned and committed carbon emissions, *Earth Interactions*, 10(Art. No. 6).
- Andreae, M. O., D. Rosenfeld, P. Artaxo, A. A. Costa, G. P. Frank, K. M. Longo, and M. A. F. Silva-Dias (2004)**, Smoking rain clouds over the Amazon, *Science*, 303, 1337-1342.
- Aragão, L. E., Y. Malhi, R. M. Roman-Cuesta, S. Saatchi, L. O. Anderson, and Y. E. Shimabukuro (2007)**, Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts, *Geophysical Research Letters*, 34(7).
- Artma, E., P. Barreto, and M. Brito (2005)**, Pecuaría na Amazônia: Tendências e implicações para a conservação ambiental, Instituto do Homen e Meio-Ambiente da Amazônia, Belém, Pará (Brazil).
- Artm, J. (2007)**, O novo capitalismo ambiental pode salvar a Amazonia?, *Revista Epoca*, 23 de Julho, 74-79.
- Asner, P. A., D. E. Knapp, E. N. Broadbent, P. J. C. Oliveira, M. Keller, and J. N. Silva (2005)**, Selective logging in the Brazilian Amazon, *Science*, 310, 480-482.
- Avissar, R., and D. Werth (2005)**, Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation, *Journal of Hydrometeorology*, 6, 134-145.
- Barlow, J., and C. A. Peres (2004)**, Ecological responses to El Nino-induced surface fires in central Brazilian Amazonia: Management implications for flammable tropical forests, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 359(1443), 367-380.
- Barreto, P., P. Amaral, E. Vidal, and C. Uhl. 1998**. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108:9-26.
- Botta, A., and J. A. Foley (2002)**, Effects of climate variability and disturbances on the Amazonian terrestrial ecosystems dynamics, *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4).
- Bowman, M., G. Amacher, and F. Merry (in press)**, Fire use and management by traditional households of the Brazilian Amazon, *Ecological Economics*.
- Brando, P., D. Nepstad, E. Davidson, S. Trumbore, D. Ray, P. Camargo. In press**. Drought effects on litterfall, wood production, and below-ground carbon cycling in an Amazon forests: results of a throughfall reduction experiment. *Phil. Trans. Roy. Soc. B*
- Brown, I. F., W. Schroeder, A. Setzer, M. d. L. R. Maldonado, N. Pantoja, A. Duarte, and J. A. Marengo (2006)**, Monitoring fires in Southwestern Amazonia rain forests, *Eos*, 87(26), 253-264.
- Bruno, R. D., H. R. da Rocha, H. C. de Freitas, M. L. Goulden, and S. D. Miller (2006)**, Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest, *Hydrological Processes*, 20(12), 2477-2489.
- Bush, M. B., M. R. Silman, and D. H. Urrego (2004)**, 48,000 years of climate and forest change in a biodiversity hot spot, *Science*, 303(5659), 827-829.
- Canadell, J. G., C. Le Querec, M. R. Raupacha, C. B. Fielde, E. T. Buitenhuis, P. Ciaiss, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton, and G. C. Marland (2007)**, Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, *Proc. Nat. Acad. Sci.* egl/doi/10.1073/pnas.0702737104
- Cardnot, G. (2007)**, Tolerância a seca de uma floresta amazônica: resultados de um experimento de exclusão de chuva em larga escala, 197 pp, Universidade Federal Rio de Janeiro Rio de Janeiro, Doctoral thesis.
- Cattaneo, A. (in press)**, Regional Comparative Advantage, Location of Agriculture, and Deforestation in Brazil., *Journal of Sustainable Forestry*.
- Cochrane, M. A., A. Alencar, M. D. Schulze, C. M. Souza Jr, D. C. Nepstad, P. A. Lefebvre, and E. A. Davidson (1999)**, Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests, *Science*, 284, 1832-1835.
- Cochrane, M. A., and M. D. Schulze (1999)**, Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: Effects on forest structure, biomass, and species composition, *Biotropica*, 31(1), 2-16.
- Costa, M. H., S. N. M. Yanagi, P. Souza, A. Ribeiro, and E. J. P. Rocha (2007)**, Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion, *Geophysical Research Letters*, 34(7).
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, and I. J. Totterdell (2000)**, Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model (vol 408, pg 184, 2000), *Nature*, 408(6813), 750-750.
- Cox, P. M., R. A. Betts, M. Collins, P. P. Harris, C. Huntingford, and C. D. Jones (2004)**, Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century, *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3), 137-156.
- Da Silva, R. R., and R. Avissar (2006)**, The Hydrometeorology of a Deforested Region of the Amazon Basin, *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), 1028-1042.
- Davidson, E. A., C. J. R. de Carvalho, A. M. Figueira, F. Y. Ishida, J. Ometto, G. B. Nardoto, R. T. Saba, S. N. Hayashi, E. C. Leal, I. C. G. Vieira, and L. A. Martinelli (2007)**, Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment, *Nature*, 447(7147), 995-U996.
- Fearnside, P. M. (1997)**, Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions, *Climatic Change*, 35, 321-360.
- Friedlingstein, P., J. L. Dufresne, P. M. Cox, and P. Rayner (2003)**, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? , *Tellus*, B 55 (2), 692-700.
- Greenpeace International (2006 (April))**, Eating Up the Amazon., in <http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/eating-up-the-amazon.pdf>, edited.
- Grodzins, M. (1958)**, The metropolitan area as a racial problem, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh.
- Gullison, R. E., P. C. Frumhoff, J. G. Canadell, C. B. Field, D. C. Nepstad, K. Hayhoe, R. Avissar, L. M. Curran, P. Friedlingstein, C. D. Jones, and C. Nobre (2007)**, Tropical forests and climate policy, *Science*, 316(5827), 985-986.
- Gunderson, L. H., and C. S. Holling (2002)**, Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems, Island Press, Washington, D.C.
- Gunderson, L. H., C. S. Holling, L. Pritchard, and G. D. Peterson (2002)**, Resilience of large-scale resource systems, in *Resilience and the Behavior of Large-Scale Systems*, edited by L. H. Gunderson and L. Pritchard, pp. 3-20, Island Press, Washington, D.C.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, and M. Medina-Elizade (2006)**, Global temperature change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 14288-14293.
- Holdsworth, A. R., and C. Uhl (1997)**, Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction, *Ecological Applications*, 7(2), 713-725.

- Holmes**, T. P., G. M. Blate, J. C. Zweede, R. Pereira Jr., P. Barreto, F. Boltz, R. Bauch. 2002. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. *Forest Ecology & Management* 163: 93-110.
- Holling**, C. S. (1973), Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
- Houghton**, R. A., D. L. Skole, C. A. Nobre, J. L. Hackler, K. T. Lawrence, and W. H. Chomentowski (2000), Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon, *Nature*, 403, 301-304.
- Instituto Nacional de Pesquisa Espacial - INPE** (2007), Estimativas Anuais de Desmatamento. PROJETO PRODES MONITORAMENTO DA FLORESTA AMAZÔNICA BRASILEIRA POR SATÉLITE. , Available at <http://www.obt.inpe.br/prodes/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change** (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jipp**, P., D. C. Nepstad, K. Cassel, and C. J. R. d. Carvalho (1998), Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia, *Climatic Change*, 39(2-3), 395-412.
- Kalnowitz**, D., B. Mertens, S. Wunder, and P. Pacheco (2004), Hamburger connection fuels Amazon destruction, Center for International Forest Research, Bangor, Indonesia.
- Kauffman**, J. B., C. Uhl, and D. L. Cummings (1988), Fire in the Venezuelan Amazon I: Fuel biomass and fire chemistry in the evergreen rainforest of Venezuela, *Oikos*, 53, 167-175.
- Lawton**, R. O., U. S. Nair, R. A. Pielke Sr., and R. M. Welch (2001), Climatic Impact of Tropical Lowland Deforestation on Nearby Montane Cloud Forests *Science*, 294. no. 5542, pp. 584 - 587.
- Lean**, J., and D. A. Warrilow (1989), Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation, *Nature*, 342, 411-413.
- Macdonald**, G. E. (2004), Cogongrass (*Imperata Cylindrica*) - biology, ecology, and management, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(5), 367-380.
- Malhi**, Y., J. Timmons Roberts, R. A. Betts, T. J. Killeen, W. Li, and C. A. Nobre (In press), *Climate Change, Deforestation and the Fate of the Amazon*, Science.
- Marengo**, J. A., C. A. Nobre, J. Tomasella, M. D. Oyama, G. S. d. Oliveira, R. d. Oliveira, H. Camargo, L. M. Alves, and I. F. Brown (in press), The drought of Amazonia in 2005, *Journal of Climate*.
- Meggers**, B. J. (1994), Archeological evidence for the impact of Mega-Niño events of Amazonia during the past two millennia, *Climatic Change*, 28, 321-338.
- Mendonça**, M. J. C., M. d. C. V. Diaz, D. C. Nepstad, R. S. d. Motta, A. A. Alencar, J. C. Gomes, and R. A. Ortiz (2004), The economic costs of the use of fire in the Amazon, *Ecological Economics*, 49(1), 89-105.
- Merry**, F. D., B. S. Soares Filho, D. C. Nepstad, G. Amacher, and H. Rodrigues (submitted), A sustainable future for the Amazon timber industry, *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Myneni**, R. B., W. Z. Yang, R. R. Nemani, A. R. Huete, R. E. Dickinson, Y. Knyazikhin, K. Didan, R. Fu, R. I. N. Juarez, S. S. Saatchi, H. Hashimoto, K. Ichii, N. V. Shabanov, B. Tan, P. Ratana, J. L. Privette, J. T. Morisette, E. F. Vermote, D. P. Roy, R. E. Wolfe, M. A. Friedl, S. W. Running, P. Votava, N. El-Saleous, S. Devadiga, Y. Su, and V. V. Salomonson (2007), Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 4820-4823.
- Nakagawa**, M., K. Tanaka, N. Tohru, T. Ohkubo, T. Kato, T. Maeda, K. Satos, H. Miguchi, H. Nagamasu, K. Ogino, S. Teo, A. A. Hamid, and L. H. Seng (2000), Impact of severe drought associated with the 1997-1998 El Niño in a tropical forest in Sarawak, *Journal of Tropical Ecology*, 16, 355-367.
- Nepstad**, D. C., C. J. R. d. Carvalho, E. A. Davidson, P. Jipp, P. A. Lefebvre, G. H. d. Negreiros, E. D. da Silva, T. A. Stone, S. E. Trumbore, and S. Vieira (1994), The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures, *Nature*, 372, 666-669.
- Nepstad**, D. C., P. Jipp, P. R. d. S. Moutinho, G. H. d. Negreiros, and S. Vieira (1995), Forest recovery following pasture abandonment in Amazonia: Canopy seasonality, fire resistance and ants, in *Evaluating and Monitoring the Health of Large-Scale Ecosystems*, edited by D. Rapport, pp. 333-349, Springer-Verlag, New York.
- Nepstad**, D. C., C. Uhl, C. A. Pereira, and J. M. C. da Silva (1996), A comparative study of tree establishment in abandoned pasture and mature forest of eastern Amazonia, *Oikos*, 76, 25-39.
- Nepstad**, D. C., A. Veríssimo, A. Alencar, C. A. Nobre, E. Lima, P. A. Lefebvre, P. Schlesinger, C. Potter, P. R. d. S. Moutinho, E. Mendoza, M. A. Cochrane, and V. Brooks (1999a), Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire, *Nature*, 398, 505-508.
- Nepstad**, D. C., A. G. Moreira, and A. Alencar (1999b), Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fire: Chapter 5, in *Origins, Impacts and Alternatives to Amazonian Fire*, edited by W. Bank and Ppg-7, University of Brasília Press, Brasília, Brazil.
- Nepstad**, D. C., J. P. Capobianco, A. C. Barros, G. O. Carvalho, P. R. d. S. Moutinho, U. Lopes, and P. A. Lefebvre (2000), *Avanço Brasil: Os Custos Ambientais para a Amazônia*, edited, Gráfica e Editora Alves, Belém, Brazil.
- Nepstad**, D. C., G. O. Carvalho, A. C. Barros, A. Alencar, J. P. Capobianco, J. Bishop, P. Moutinho, P. A. Lefebvre, U. L. Silva, and E. Prins (2001), Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests, *Forest Ecology and Management*, 154, 395-407.
- Nepstad**, D. C., P. R. d. S. Moutinho, M. B. Dias-Filho, E. A. Davidson, G. Cardinot, D. Markewitz, R. Figueiredo, N. Viana, P. A. Lefebvre, D. G. Ray, J. Q. Chambers, L. Barros, F. Y. Ishida, E. Belk, and K. Schwalbe (2002), The effects of rainfall exclusion on canopy processes and biogeochemistry of an Amazon forest, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 53, 51-18.
- Nepstad**, D., P. Moutinho, and B. Soares (2006c), The Amazon in a Changing Climate: Large-Scale Reductions of Carbon Emissions from Deforestation and Forest Impoverishment, IPAM, WHRC, and UFMG, Belem, Para, Brazil.
- Nepstad**, D. C., P. A. Lefebvre, U. L. Silva Jr, J. Tomasella, P. Schlesinger, L. Solorzano, P. R. d. S. Moutinho, and D. G. Ray (2004), Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis, *Global Change Biology*, 10, 704-717.
- Nepstad**, D. C., S. Schwartzman, B. Bamberger, M. Santilli, D. G. Ray, P. Schlesinger, P. A. Lefebvre, A. Alencar, E. Prins, G. Fiske, and A. Rolla (2006b), Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands, *Conservation Biology*, 20(1), 65-73.
- Nepstad**, D. C., C. M. Stickler, and O. T. Almeida (2006a), Globalization of the Amazon soy and beef industries: opportunities for conservation, *Conservation Biology*, 20(6), 1595-1603.
- Nepstad**, D., I. Tohver, D. Ray, P. Moutinho, and G. Cardinot (2007), Long-term experimental drought effects on stem mortality, forest structure, and dead biomass pools in an Eastern-Central Amazonian forest, *Ecology*, 88(9), 2259-2269.
- Nepstad**, D. C., and C. M. Stickler (in press), Managing the tropical agriculture revolution, *Journal of Sustainable Forestry*.

- Nobre, C. A., P. J. Sellers, and J. Shukla (1991)**, Amazonian deforestation and regional climate change, *Journal of Climate*, 4, 957-988.
- Oyama, M. D., and C. A. Nobre (2003)**, A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America, *Geophysical Research Letters*, 30(23), Art. No. 2199.
- Pan-American Health Organization (PAHO) (2004)**, The Houston Declaration, Hemispheric Conference on the Eradication of Foot-and-Mouth Disease, Houston, Texas.
- Pimentel, D., and T. W. Patzek (2005)**, Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower, *Natural Resources Research*, 14(1), 65-76.
- Ray, D., D. Nepstad, and P. Moutinho (2005)**, Micrometeorological and canopy controls of flammability in mature and disturbed forests in an east-central Amazon landscape, *Ecological Applications*, 15(5), 1664-1678.
- Saleska, S. R., K. Didan, A. R. Huete, and H. R. da Rocha (2007)**, Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought, *Science*, 318, 612.
- Salati, E., and R. Vose (1984)**, Amazon basin: A system in equilibrium, *Science*, 225, 129-138.
- Salazar, L. F., C. A. C. A. Nobre, and M. D. Oyama (2007)**, Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America, *Geophysical Research Letters*, 34.
- Sampalo, G., C. Nobre, M. C. Costa, P. Satyamurty, B. S. Soares-Filho, and M. Cardoso (2007)**, Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion., *Geophysical Research Letters*, 34, L17709, doi:10.1029/2007GL030612.
- Sanford, R. L., J. Saldarriaga, K. Clark, C. Uhl, and R. Herrera (1985)**, Amazon rain-forest fires, *Science*, 227, 53-55.
- Schelling, T. (1971)**, Dynamic models of segregation., *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143-186.
- Shean, M. J. (2004)**, The Amazon: Brazil's Final Soybean Frontier, US Foreign Agricultural Service/Production Estimates and Crop Assessment Division, http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2004/01/Amazon/Amazon_soybeans.html.
- Silva Dias, M. A. F., S. Rutledge, P. Kabat, P. L. Silva Dias, C. Nobre, G. Fisch, A. J. Dolman, E. Zipser, M. Garstang, A. O. Manzi, J. D. Fuentes, H. R. Rocha, J. Marengo, A. Plana-Fattori, L. D. A. Sá, R. C. S. Alvalá, M. O. Andreae, P. Artaxo, R. Gielow, and L. Gatti (2002)**, Cloud and rain processes in biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon region, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 8072.
- Soares-Filho, B. S., D. C. Nepstad, L. M. Curran, G. C. Cerqueira, R. A. Garcia, C. A. Ramos, E. Voll, A. McDonald, P. Lefebvre, and P. Schlesinger (2006)**, Modelling conservation in the Amazon basin, *Nature*, 440(7083), 520-523.
- Timmermann, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif, and E. Roeckner (1999)**, Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming, *Nature*, 395, 694-697.
- Trenberth, K. E., and T. J. Hoar (1997)**, El Niño and climate change, *Geophysical Research Letters*, 24(23), 3057-3060.
- Uhl, C., and I. C. G. Vieira (1989)**, Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon, *Biotropica*, 21(2), 98-106.
- Uhl, C., and J. B. Kauffman (1990)**, Deforestation, fire susceptibility and potential tree responses to fire in the eastern Amazon, *Ecology*, 71(2), 437-449.
- Van Nieuwstadt, M. G. L., and D. Sheil (2005)**, Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia, *Journal of Ecology*, 93(1), 191-201.
- Werth, D., and R. Avissar (2002)**, The local and global effects of Amazon deforestation, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 107, doi: 10.1029/2001JD000717.
- Williamson, G. B., W. F. Laurance, A. A. Oliveira, P. Delamonica, C. Gascon, T. E. Lovejoy, and L. Pohl (2000)**, Amazonia tree mortality during the 1997 El Niño drought, *Conservation Biology*, 14(5), 1538-1542.
- Worldwatch Institute. 2006**. Biofuels for Transportation: Global Potential and Implications for Sustainable Energy in the 21st Century. London: Earthscan.
- Xavler, M.R. 2007**. The Brazilian Sugarcane Ethanol Experience. Issue Analysis No. 3. Washington, D.C.: Competitive Enterprise Institute. Available at <http://www.cei.org/pdf/5774.pdf>
- Yacobucci, B. D., and R. Schnepf (2007)**, Ethanol and biofuels, U.S. Congressional Research Service, Washington, D.C.
- Zarin, D. J., M. J. Ducey, J. M. Tucker, and W. A. Salas (2001)**, Potential biomass accumulation in Amazonian regrowth forests, *Ecosystems*, 4, 658-668.