



O Futuro Climático da Amazônia

Relatório de Avaliação Científica

Antonio Donato Nobre

ARA
Articulación Regional
Amazônica

O Futuro Climático da Amazônia

Relatório de Avaliação Científica

Antonio Donato Nobre, PhD*

Pesquisador no CCST** MCTi/INPE

Pesquisador do MCTi/INPA

Realização:

Articulación Regional Amazónica (ARA)

Suporte Institucional:

Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Parceria Estratégica:

Avina e Avina Americas

Fundo Vale

Fundação Skoll

Suporte:

Instituto Socioambiental

Projetos Rios Voadores

WWF

* Antonio Donato Nobre ([currículo Lattes](#)) estuda o sistema terrestre com interesse interdisciplinar e atuação na popularização da ciência. É pesquisador sênior do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia desde 1985 e atua desde 2003 no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

** O [Centro de Ciência do Sistema Terrestre](#) do INPE é um novo departamento do INPE para pesquisa multi e interdisciplinar sobre a Terra e seu funcionamento.

Sumário Executivo

Este relatório de avaliação do futuro climático da Amazônia consiste de uma revisão e síntese da literatura científica, articulada com análises interpretativas das questões mais importantes relacionadas ao assunto.

Sem perder o foco na ciência, trata dos temas com linguagem acessível e aspiração holística, isto é, busca ligar fontes e muitas análises de especialistas em uma imagem coerente do ecossistema Amazônico.

Suas linhas mestras são o potencial climático da grande floresta – fator crítico para todas sociedades humanas –, sua destruição com o desmatamento e o fogo e o que precisa ser feito para frear o trem desgovernado em que se transformaram os efeitos da ocupação humana sobre o clima em áreas de floresta.

O tema é vasto. Por isso é preciso tratá-lo em certa sequência cronológica.

❶ O texto começa pelo pano de fundo do fator chave na história geológica: o tapete tecnológico¹ da biodiversidade amazônica, que levou dezenas de milhões de anos para formar sua capacidade funcional. Os processos da vida que operam na floresta contêm complexidade quase incompreensível, com um número astronômico de seres funcionando como engrenagens articuladas em uma fenomenal máquina de regulação ambiental.

❷ A seguir, o texto passa à descrição das capacidades da Amazônia no seu estado intocado: o oceano-verde² da floresta e sua relação com o oceano gasoso da atmosfera, com o qual troca gases, água e energia, e com o oceano azul dos mares, fonte primária e repositório final da água que irriga os continentes. Desde Humboldt³ até hoje, a ciência revelou importantes segredos acerca do poder da grande floresta sobre os elementos que fazem o clima. Aqui exploramos cinco descobertas importantes para a ecohidrologia Amazônica.

Cinco segredos desvendados

O primeiro segredo é que a floresta mantém úmido o ar em movimento, o que leva chuvas para áreas continente adentro, distantes dos oceanos. Isso se dá pela capacidade inata das árvores de transferir grandes volumes de água do solo para a atmosfera através da transpiração.

O segundo segredo é a formação de chuvas abundantes em ar limpo. As árvores emitem substâncias voláteis precursoras de sementes de condensação do vapor d'água, cuja eficiência na nucleação de nuvens resulta em chuvas fartas e benignas.

O terceiro segredo é a sobrevivência da floresta Amazônica a cataclismos climáticos e sua

¹ Por falta de melhor termo, o uso metafórico do conceito da *tecnologia* quer indicar uma dimensão natural (não humana) da incrível complexidade e sofisticação existente nos sistemas vivos, que opera automaticamente em nanoescala (bilionésimos de metro), de modo a criar e manter a habitabilidade e conforto ambiental. Nas palavras de Arthur C. Clark "qualquer tecnologia suficientemente avançada é indistinguível da magia." A tecnologia da natureza é inconcebivelmente avançada.

² Essa expressão metafórica *oceano-verde* descreve as características oceânicas desta extensão continental coberta por densas florestas. A importância deste conceito novo e incomum reside na sua sugestão de uma superfície florestal, estendida abaixo da atmosfera, cuja características de vastidão, humidade e trocas pelos ventos se assemelham às dos oceanos reais.

³ Alexander von Humboldt, influente cientista-naturalista alemão que explorou as Américas na virada do século 18 para o século 19, considerado o pai de ciências como geografia, física, meteorologia e ecologia.

formidável competência em sustentar um ciclo hidrológico benéfico, mesmo em condições externas desfavoráveis. Segundo a nova teoria da bomba biótica, a transpiração abundante das árvores, casada com uma condensação fortíssima na formação das nuvens e chuvas – condensação essa maior que aquela nos oceanos contíguos –, leva a um rebaiamento da pressão atmosférica sobre a floresta, que suga o ar úmido sobre o oceano para dentro do continente, mantendo as chuvas em quaisquer circunstâncias.

O quarto segredo indica a razão de a porção meridional da América do Sul, a leste dos Andes, não ser desértica, como áreas na mesma latitude, a oeste dos Andes e em outros continentes. A floresta amazônica não somente mantém o ar úmido para si mesma, mas exporta rios aéreos de vapor que transportam a água para as chuvas fartas que irrigam regiões distantes no verão hemisférico.

O quinto segredo desvendado é o motivo pelo qual a região amazônica e oceanos próximos não fomentam a ocorrência de fenômenos atmosféricos como furacões e outros eventos climáticos extremos. A atenuação da violência atmosférica tem explicação no efeito dosador, distribuidor e dissipador da energia nos ventos, exercido pelo rugoso dossel florestal, e da aceleração lateral de larga escala dos ventos na baixa atmosfera, promovida pela bomba biótica, o que impede a organização de furacões e similares. A condensação espacialmente uniforme

sobre o dossel florestal impede concentração de energia dos ventos em vórtices destrutivos, enquanto o esgotamento de humidade atmosférica pela remoção lateral de cima do oceano, priva as tempestades do seu alimento energético (vapor de água) nas regiões oceânicas adjacentes a grandes florestas.

Todos esses efeitos em conjunto fazem da majestosa floresta Amazônica a melhor e mais valiosa parceira de todas as atividades humanas que requerem chuva na medida certa, um clima ameno e proteção de eventos extremos.

- 3 O relatório continua com a descrição dos efeitos do desmatamento e do fogo sobre o clima: a devastação da floresta oceano-verde gera um clima dramaticamente inóspito. Modelos climáticos anteciparam, há mais de 20 anos, variados efeitos danosos do desmatamento sobre o clima, já confirmados por observações. Entre eles estão a redução drástica da transpiração, a modificação na dinâmica de nuvens e chuvas e o prolongamento da estação seca. Outros efeitos não previstos, como o dano por fumaça e fuligem à dinâmica de chuvas, mesmo sobre áreas de floresta não perturbada, também estão sendo observados.

O dano do desmatamento, assim como os danos do fogo, da fumaça e da fuligem, ao clima, são candentemente evidentes nas observações científicas de campo. As análises baseadas em modelos

atualizados e em nova teoria física projetam um futuro ainda pior. Emerge como fator principal a afetar o clima a grave extensão acumulada do desmatamento amazônico, até 2013 no Brasil em quase 763.000 km² (área equivalente a 184 milhões de campos de futebol ou três estados de São Paulo). Tal superfície precisa ainda ser somada à fração de impacto da extensão acumulada da menos falada e menos estudada degradação florestal (estimada em mais de 1,2 milhão de km²).

- 4 O relatório prossegue relacionando os dois itens anteriores, floresta oceano-verde e desmatamento, no contexto temporal mais estendido: o equilíbrio vegetação-clima, que balança na beira do abismo. Modelos climáticos ligados interativamente a modelos de vegetação exploram quais são as extensões de tipos de vegetação e as condições climáticas capazes de gerar estáveis equilíbrios vegetação-clima.

Para a Amazônia, esses modelos projetam a possibilidade de dois pontos possíveis e alternativos de equilíbrio: um que favorece a floresta (úmido, atual para a bacia amazônica e histórico) e outro que favorece a savana (mais seco, atual para o Cerrado, futuro para a bacia amazônica).

O ponto preocupante desses exercícios de modelagem é a indicação de que aproximadamente 40% de remoção da floresta oceano-verde poderá deflagrar a transição de larga escala para o equilíbrio da

savana, liquidando, com o tempo, até as florestas que não tenham sido desmatadas. O desmatamento por corte raso atual beira os 20% da cobertura original na Amazônia brasileira, e a degradação florestal, estima-se, já teria perturbado a floresta remanescente em variados graus, afetando adicionalmente mais de 20% da cobertura original.

- ⑤ A seção final do relatório recomenda um plano de mitigação baseado na reversão radical tanto dos danos passados quanto a das expectativas de danos futuros: um esforço de guerra. As florestas da Amazônia são essenciais para a manutenção do clima, e com ele a segurança das gerações futuras. Felizmente, os avanços nas ciências fazem desta guerra um desafio que pode ser bem sucedido.

Apesar da dificuldade em separar precisamente os efeitos de fundo das mudanças climáticas globais daquelas locais e regionais, não resta a menor dúvida de que os impactos do desmatamento, da degradação florestal e dos efeitos associados já afetam o clima próximo e distante da Amazônia. Já afetam em alto grau hoje em dia e prometem afetar ainda mais seriamente no futuro, a ponto de que a única opção responsável que se coloca é agir vigorosamente no combate às causas.

Como primeira ação, impõe-se a universalização e facilitação de acesso às descobertas científicas, que podem reduzir a pressão da principal causa do desmatamento: a ignorância.

Em segundo lugar, é preciso estancar a sangria da floresta, ou seja, zerar o desmatamento, a degradação florestal e o fogo já, com todos e quaisquer recursos e meios éticos possíveis, no interesse da vida. Ao mesmo tempo, em vista do diagnóstico de que desmatamento e degradação acumulados constituem-se no mais grave fator de dano ao clima, torna-se necessário e inevitável desenvolver um amplo esforço para replantar e restaurar a floresta destruída.

Tal esforço precisa ter perspectiva de médio e longo prazos para culminar com a regeneração da floresta oceano-verde original. Diante disso, as elites governantes podem, devem e precisam tomar a dianteira na orquestração da grande mobilização de pessoas, recursos e estratégias que possibilitem recuperar o tempo perdido.

Na conclusão, ao apontar para a urgência de ações de proteção e restauro da grande floresta, acena com oportunidades reais na viabilidade de trilharmos um novo caminho, onde a floresta protegida e recomposta seja a principal aliada das atividades humanas, dentro e fora da Amazônia.

Agradecimentos

Agradecimentos a todos que contribuíram para o aporte de informação qualificada a este relatório, em especial para Enéas Salati, no histórico dos estudos isotópicos; Martin Hodnett, José Marengo e Celso Randow, nos números da evapotranspiração; Diógenes Alves e Dalton Valeriano, nos números do desmatamento; José Marengo, pelos alertas focados e muito úteis; Anita Drumond, pelos cálculos sobre evaporação no oceano; Antonio Manzi, que levantou questões sobre a circulação planetária; Victor Gorshkov e Anastassia Makarieva que deram respostas a essas questões e pelas correções cruciais sobre a física atmosférica; Claudio Maretti, por ajudar a colocar as questões de preservação em perspectiva; Elisangela Broedel pela revisão crítica dos números do desmatamento e da destruição de árvores; Yosio Shimabukuro e Scott Saleska pelas informações relativas a área da Amazônia e densidade de árvores; Gilvan Sampaio pelas correções no texto sobre modelos de equilíbrio vegetação-clima; Meirat Andreae e Steven Wofsy pelas referências e orientações sobre química atmosférica; German Poveda pelas referências e conselhos referente às geleiras dos Andes; Suprabha Sechan por levantar as dificuldades relativas a tecnologia; às excelentes críticas e sugestões feitas pelos comentadores e pelo público na 3ª reunião Pan-Amazônica da ARA, em Lima; às questões e reações do público no debate feito pela Nossa São Paulo e pelo Instituto Ethos sobre a crise da água na região metropolitana de São Paulo; Sérgio Guimarães, Márcio Santilli, Paulo Nobre, Tasso Azevedo, Adriana Cuartas, Lou Gold, Foster Brown, Claudio Maretti, Victor Gorshkov, Anastassia Makarieva, Stephan Schwartzman e Robert Harriss pelas excelentes e inspiradoras revisões; Marcos Losekann e a Gerard e Margi Moss pelas perguntas instigantes, que levaram a mais aperfeiçoamentos no texto; Marcelo Leite pela sóbria revisão profissional e de alta qualidade, essencial no ajuste e melhoria do texto; Jaime Gesisky e Moema Ungarelli pelo cuidado e rigor na revisão final; Felipe Horst pela bela diagramação; Margi Moss pela revisão estelar de estilo e fluência; à Articulación Regional Amazónica pela encomenda do estudo e à Secretaria Executiva da ARA, em especial ao Sérgio Guimarães e Claudio Oliveira pelo suporte e estímulos constantes. Agradecimentos especiais ao CCST do INPE e ao INPA, pelo apoio institucional; a Avina, Fundo Vale e Skoll Foundation, pela parceria valiosa; ao ISA, Projeto Rios Voadores e WWF, pelo suporte.

Sumário

Introdução – A tecnologia da floresta é insubstituível	9
1) As florestas geram o clima amigo: cinco segredos revelados	11
1.1) Reciclagem de umidade: <i>geisers</i> da floresta	11
1.2) Nucleação das nuvens: o <i>pó de pirlimpimpim</i> no oceano verde	14
1.3) Bomba biótica de umidade: doar água para receber chuva	15
1.4) Rios aéreos: água fresca pelas artérias suspensas	17
1.5) Dossel rugoso: freio de arrumação nos ventos	19
2) O desmatamento leva ao clima inóspito: sem árvores, não dá para tapar o sol	20
2.1) Desmatamento virtual: simulando a aniquilação das árvores	20
2.2) Desmatamento real: olhos de águia no espaço	22
3) Amazônia e o calcanhar de Aquiles: o herói invencível tomba	25
3.1) Ponto de não retorno: o passo em falso no abismo	25
3.2) Savanização e desertificação: dano extensivo ou dano impensável?	26
4) O futuro climático da Amazônia: já chegou	28
4.1) Reciprocidade climática: o desmatamento acumulado cobra sua fatura	29
4.2) Ordem de urgência: antes tarde do que nunca	30
5) Florestas de oportunidades: cinco passos para recuperar o clima	32
5.1) Popularizar a ciência da floresta: saber é poder	32
5.2) Zerar o desmatamento: para anteontem	32
5.3) Acabar com o fogo, a fumaça e a fuligem: chamem os bombeiros!	33
5.4) Recuperar o passivo do desmatamento: a fênix ressurgir das cinzas	33
5.5) Governantes e sociedade precisam despertar: choque de realidade	34
Conclusão	36
Epílogo: o prólogo de uma nova era	37
Referências	38

Introdução

A tecnologia da floresta é insubstituível

Numa definição solta, a floresta tropical é um tapete multicolorido, estruturado e vivo, extremamente rico. Uma colônia extravagante de organismos que saíram do oceano há 400 milhões de anos e vieram para a terra. Dentro das folhas ainda existem condições semelhantes às da primordial vida marinha. Funciona assim como um mar suspenso, que contém uma miríade de células vivas, muito elaborado e adaptado. Evoluída nos últimos 50 milhões de anos, a floresta amazônica é o maior parque tecnológico que a Terra já conheceu, porque cada organismo seu, entre trilhões, é uma maravilha de miniaturização e automação. Em temperatura ambiente, usando mecanismos bioquímicos de complexidade quase inacessível, a vida processa átomos e moléculas, determinando e regulando fluxos de substâncias e de energia.

As florestas condicionam o clima que lhes favoreça, e com isso geram estabilidade e conforto, sob cujo abrigo florescem sociedades humanas.

de muitas outras competências –, à colônia de seres vivos que têm a capacidade de fazer fotossíntese. O gás carbônico (CO₂) funciona como alimento para a planta, matéria-prima transformada pelo instrumental bioquímico com o uso de luz e água, em madeira, folhas, frutos, raízes⁴. De forma encadeada, quando as plantas consomem CO₂, a concentração desse gás na atmosfera diminui.

O conforto climático que apreciamos na Terra, desconhecido em outros corpos siderais, pode ser atribuído, em grande medida – além

Com isso, num primeiro momento o planeta se esfria, o que faz as plantas crescerem menos, consumindo menos CO₂. No momento seguinte, a acumulação de CO₂ leva ao aquecimento do planeta, e assim sucessivamente, num ciclo oscilante de regulação⁵. Desta forma, as plantas funcionam como um termostato, que responde às flutuações de temperatura através do ajuste da concentração do principal gás-estufa na atmosfera, depois do vapor d'água. Mas esta regulação da temperatura via consumo mediado do CO₂ é apenas um entre muitos mecanismos da vida que resultam na regulação favorável do ambiente.

Como se verá neste trabalho, as florestas tropicais são muito mais que uma aglomeração de árvores, repositório passivo de biodiversidade ou simples estoque de carbono. Sua tecnologia viva e dinâmica de interação com o ambiente lhes confere poder sobre os elementos, uma capacidade inata e resiliente de condicionamento climático. Assim, as florestas condicionam o clima que lhes favoreça, e com isso geram estabilidade e conforto, cujo abrigo dá suporte ao florescimento de sociedades humanas.

A América do Sul é um continente privilegiado pela extensiva presença de florestas megabiodiversas. Não por acaso, esse continente teve, e ainda tem, um dos climas mais favoráveis em comparação com qualquer outro. Contudo, ao longo de 500 anos, a maior parte da vegetação nativa fora da bacia amazônica foi

⁴ Animações em biologia molecular: <http://www.johnkyrk.com/index.pt.html>

⁵ Biotic Regulation of the Environment: <http://www.bioticregulation.ru/>

aniquilada, como a Mata Atlântica, que perdeu mais de 90% da sua cobertura original. O efeito desse desmatamento histórico no clima, embora perceptível, foi menos notado do que seria de se esperar, e a razão foi a costa quente (e úmida) da floresta amazônica, que manteve o continente razoavelmente protegido de extremos com um clima ameno. Mas, nos últimos 40 anos, a última grande floresta, a cabeceira das águas atmosféricas da maior parte do continente, esteve sob o ataque implacável do desmatamento. Coincidentemente, aumentaram as perdas com desastres naturais ligados a anomalias climáticas, tanto por excessos (de chuva, calor e ventos), quanto por falta (secas)⁶.

As regiões andinas, e mesmo da costa do Pacífico, que dependem das geleiras para seu abastecimento de água, poderão em futuro próximo ver-se ameaçadas, pois o derretimento acelerado pelo aquecimento climático já está em andamento, e também porque quase toda a precipitação nas altas montanhas, que suprem as geleiras ano a ano, tem sua matéria-prima no vapor procedente da floresta amazônica⁷. A leste dos Andes, a escala da dependência no ciclo hidrológico amazônico é incomensuravelmente maior.

As regiões de savana na parte meridional, onde há hoje um dos maiores cinturões de produção de grãos e outros bens agrícolas, também recebe da floresta amazônica vapor formador de chuvas reguladas e benignas, o principal insumo da agricultura. Não fosse também

a língua de vapor que, no verão hemisférico, pulsa da Amazônia para longe, levando chuvas essenciais⁸ e outras influências benéficas, muito provavelmente teriam clima inóspito as regiões Sudeste e Sul do Brasil (onde hoje se encontra sua maior infraestrutura produtiva nacional) e outras áreas, como o Pantanal e o Chaco, as regiões agrícolas na Bolívia, Paraguai e Argentina.

Este trabalho mostrará primeiro o que sabemos sobre como a floresta amazônica funciona e mantém sua capacidade de existir e persistir por eras geológicas. Depois exibirá o efeito sobre o clima que a destruição do sistema natural já está gerando e as previsões sobre o que ainda pode gerar. Por fim, explorará as ameaças ao equilíbrio climático que as alterações em curso podem disparar, analisando sob alguns ângulos os riscos climáticos à espreita.



6 (Marengo et al., 2013) Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation (Marengo et al., 2011) Extreme climatic events in the Amazon basin.

7 (Rabatel et al., 2012) Review article of the current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change.

8 (Willmot & Webber, 1998) South American Climate Data <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>



1) As florestas geram o clima amigo: cinco segredos revelados

Buscando esclarecer mistérios, o trabalho dos cientistas não difere muito da investigação de um detetive. Exploram pistas, analisam evidências, desenvolvem teorias, constroem modelos. Nas deduções eletrizantes de Sherlock Holmes, os casos mais intrincados culminavam com soluções elementares. A realidade do mundo natural mostra-se rica e complexa, repleta de mistérios e segredos. Mas o método científico, temperado pelo fascínio e humanizado pela curiosidade infantil, abre portais de acesso à compreensão dos fenômenos mais misteriosos que nos afetam.

Tais fenômenos, ao serem clarificados e elevados à sua expressão mais simples, democratizam o conhecimento da ciência, ensejando o desenvolvimento de uma nova e estimulante consciência compartilhada sobre o mundo que habitamos. Existem ainda muitos segredos sobre o funcionamento das florestas bem guardados na natureza. Olhemos aqui para apenas cinco deles, revelados nas últimas décadas, segredos que são cruciais para o entendimento das funções das florestas no condicionamento do clima.

No afã de modelar com o uso de computadores os fluxos colossais de massa e energia para simular o clima, os meteorologistas inicialmente prestaram pouca atenção na cobertura de vegetação. Essa abordagem mudou radicalmente. Por um número grande e crescente de evidências, hoje se sabe do papel vital exercido pela vegetação em muitos processos do clima. E praticamente todos os

Por um número grande e crescente de evidências, sabe-se hoje do papel vital exercido pela vegetação em muitos processos do clima.

modelos do clima, assim como os mais complexos modelos do sistema terrestre, passaram a incluir representações elaboradas da vegetação. As descobertas científicas sobre o papel determinante das florestas nos ciclos local, regional e planetário de água, energia, carbono e outros valem para todas as florestas naturais do globo. Mas aqui vamos focalizar mais as florestas tropicais da América do Sul, especialmente a Amazônia.

Todos os estudos de modelagem climática consideram a bacia amazônica inteira. Mas, por haver mais dados disponíveis, é na Amazônia brasileira⁹ que se realizou a maioria dos outros trabalhos científicos, como o monitoramento do desmatamento. Não obstante, dada a importância da bacia amazônica como um todo, a chamada Pan-Amazônia, e também porque a atmosfera e os rios não se importam com limites políticos, no futuro as observações, mapeamentos e análises precisarão romper as fronteiras nacionais, a exemplo do que já fazem projetos como a RAISG com levantamento extensivo e integrado das pressões humanas sobre a Amazônia¹⁰.

1.1) Reciclagem de umidade: *geisers* da floresta

Trezentos anos após a invasão europeia nas Américas¹¹, a aura de Jardim do Éden nas selvas tropicais já decaía de seu apelo romântico, possivelmente pela trombada dos cobiçosos conquistadores espanhóis com o

⁹ Definida dentro do que, durante a ditadura brasileira (1964-1985), foi definida por decreto como Amazônia Legal.

¹⁰ RAISG Red Amazônica de Información Socioambiental Georreferenciada; [Amazônia sob pressão](#).

¹¹ (Gambini, 2000) Espelho índio: a formação da alma brasileira.

inferno verde, aquele labirinto infindável, monótono e perigoso que passou a inspirar mais medo e desespero do que fascinação. O século 19, com seus naturalistas científicos, vê reacender a fascinação, mas agora tingida por um apelo racional. Alexander von Humboldt, o aclamado e influente cientista-naturalista alemão que explorou as Américas na virada do século 18 para 19, é considerado o pai de ciências como geografia física, meteorologia e ecologia. Ele empregou o termo *hilea* [do grego, floresta selvagem] para a Amazônia e, com a riqueza e encantamento das suas descrições minuciosas, inspirou gerações de naturalistas, Darwin entre eles. De Humboldt vêm as primeiras sugestões da ligação entre a floresta, a umidade do ar e o clima.

Porém, no início do século 20, o polímata, autor prolífico e militar Euclides da Cunha rompe o encantamento do naturalismo científico com suas descrições desapontadas da hilea. Seu discípulo Alberto Rangel, que, como o mestre, também se sensibilizara com a miséria dos seringueiros e as agruras da vida na selva,

Transpiração: plantas não usam desodorante

As plantas suam. A água, ao evaporar, resfria a folha e o ambiente. Mas a transpiração nas plantas é muito mais importante que isso. A transpiração promove a sucção pelas raízes e o fluxo ao longo do tronco, até as folhas, da água do solo, que carrega consigo nutrientes; permite que a folha abra seus microportais para a atmosfera (estômatos), por onde sai o vapor, mas também por onde entra o adubo gasoso mais essencial, o CO₂. E os odores produzidos pelas plantas, os gases orgânicos que desempenham muitos papéis no funcionamento da atmosfera e das chuvas, saem junto com a água transpirada. Portanto, sem transpirar a planta deixaria de regular seu próprio bem-estar, cessaria de controlar o ambiente e acabaria morrendo por falta de nutrientes, dentre eles o CO₂, e excesso de temperatura.

ressuscita na obra *Inferno Verde* a perspectiva de danação dos invasores espanhóis e desmonta de vez a imagem de paraíso verde. O voluntarismo verbal contra o *habitat* selvagem, lastreado pela admitida ignorância desses autores quanto ao valor intrínseco da floresta, em compasso com a falência do fausto da borracha, muito provavelmente deixou sua herança de valores a influenciar corações e mentes.

Quanto do subsequente ímpeto para a “ocupação” da Amazônia, com a radical supressão da mata, não teve raízes aí? Euclides da Cunha, prefaciando o livro do discípulo, nega valor para a abordagem holística de Humboldt (“*a epistemologia da ‘ciência amazônica’ florescerá se se preocupar menos em revelar a hilea por inteiro*” sic) e antecipa a demanda reducionista que viria¹².

A reciclagem de umidade da chuva pela evaporação da floresta mantém o ar úmido por mais de 3 mil km continente adentro.

Tardios foram os estudos que finalmente começaram a revelar os segredos da grande floresta. Buscando testar cálculos preliminares de balanço hídrico para a Amazônia¹³ que indicavam reciclagem importante da água, Enéas Salati liderou nos anos 1970 estudos observacionais de chuva e evaporação que demonstraram inequivocamente como, através da reciclagem de umidade, a floresta mantém o ar úmido por mais de 3.000 km continente adentro¹⁴.

12 Rafael Leandro assim reflete a expressão de Euclides da Cunha naquele prefácio: “*a enormidade da floresta só pode ser medida, se repartida... somente num futuro tardio, se conhecerá os segredos da Natureza [...] A definição dos últimos aspectos da Amazônia será o fecho de toda a História Natural...*” (Leandro, 2009) *Inferno Verde: Representação Literária da Amazônia na Obra de Alberto Rangel*.

13 (Molion 1975) A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects; (Villa Nova et al. 1976) Estimativa de evapotranspiração na Bacia Amazônica; (Marques et al. 1977) Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus.

14 (Salati et al, 1979) Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study.

15 Projetos de pesquisa na Amazônia: ARME, NASA-GTE ABLE, ABRACOS, TRACE-A, RBLE, CAMREX, INPA-Max Planck, INPA-ORSTOM, PDBFF, PELD, LBA, LBA-EUSTACH, LBA-CARBONSINK, LBA-CLAIRE, LBA-ECO, LBA-Barca, LBA-DMIP, GEWEX, ISLSCP, GEOMA, PPBio, Rainfor, AmazonFlux, AMAZE, Amazon Pire, Amazalert, AMAZONICA, Changing Amazônia, ATTO, ACRIDICON-CHUVA, GreenOceanAmazon etc. Apenas no âmbito do grande projeto LBA, foram desenvolvidos 217 subprojetos de pesquisa em 16 anos de operação.

Mas ainda faltavam muitas outras explicações sobre onde, quanto, como, por que e com que implicações. Adotando sem saber a sugestão reducionista de Euclides da Cunha, nas três décadas seguintes aos estudos de Salati, mais de duas dúzias de grandes projetos de investigação¹⁵, congregando centenas de cientistas e usando muitos laboratórios, instrumentos sofisticados, torres, aviões, barcos, satélites, supercomputadores e o que mais há de ferramenta científica, produziram milhares de artigos, dezenas de livros e bancos de dados alentados, a maioria informação de difícil interpretação isolada.

Diz-se que o cientista de hoje é aquele que estuda cada vez mais sobre cada vez menos, até que conhece tudo sobre o nada. Como é irônico que, 200 anos depois, a forma mais produtiva de extrair sentido da enormidade dessas pesquisas pontuais seja justamente retomar a abordagem holística de Humboldt, articulando a riqueza de dados soltos e construindo uma narrativa integrada e funcional a respeito da concentração fenomenal de vida e seu poder sobre os elementos nas florestas da Amazônia.

Vejamos como podemos captar aspectos espetaculares do funcionamento da floresta acompanhando a narrativa do percurso da água da atmosfera, pela intimidade das plantas e de volta para a atmosfera.



Depois que as nuvens precipitam seu precioso líquido sobre a floresta, grande parte da água se esgueira por entre o dossel e infiltra-se pelo permeável solo florestal, onde é armazenada no pacote poroso do solo, ou mais abaixo, em aquíferos gigantescos, verdadeiros oceanos subterrâneos de água doce.

A água do solo começa seu retorno para a atmosfera absorvida por profundos e sofisticados sugadores, as raízes; depois sobe desafiando a força da gravidade por 40 a 60 m, ou mais, em elaboradas tubulações no xilema dos troncos. Sua última etapa passa pelas estruturas laminares evaporadoras das folhas, versáteis painéis solares químicos capazes de absorver a energia do sol e aproveitar a carícia dos ventos para transpirar e transferir copiosos volumes de água vaporosa para a atmosfera, completando assim o retorno do ciclo vertical iniciado com a chuva.

Uma árvore grande pode bombear do solo e transpirar mais de mil litros de água num único dia. Uma árvore grande pode bombear do solo e transpirar mais de mil litros de água num único dia¹⁶. A Amazônia sustenta centenas de bilhões de árvores em suas florestas. Vinte bilhões de toneladas de água por dia são transpiradas por todas as árvores na bacia amazônica¹⁷. Em seu conjunto, as árvores, essas benevolentes e silenciosas estruturas verdes vivas da natureza, similares a *geisers*, jorram para o ar um rio vertical de vapor mais importante que o Amazonas¹⁸.

Geiser de vapor: maior que o rio Amazonas

Buscando quantificar de modo simples a transpiração massiva da floresta sugerida pelos estudos de Salati e outros, fizemos, juntamente com Adriana Cuartas, em 2007, um cálculo revelador. Usando os dados de evaporação coletados nas torres de fluxo do projeto LBA (3,6 mm ao dia, ou 3,6 litros por m², em média), estimamos a quantidade total diária de água fluindo do solo para a atmosfera através das árvores. Cobrindo 5,5 milhões de km², o cálculo para a floresta na bacia amazônica resultou no fantástico número de 20 bilhões de toneladas de água transpirada ao dia (ou 20 trilhões de litros). Mais de 22 bilhões se considerarmos todas as florestas da porção equatorial da América do Sul, e 25 bilhões ou mais se considerarmos as florestas que existiam no seu estado pristino em 1500¹⁷. Para comparação: o volume despejado no oceano Atlântico pelo rio Amazonas é pouco mais de 17 bilhões de toneladas ao dia¹⁸.

20 bilhões de toneladas de água por dia são transpiradas por todas as árvores na bacia amazônica. Como em um edifício com muitos pisos, um metro quadrado de chão na

Amazônia pode ter sobre si até 10 m² de intrincada superfície foliar distribuída em diferentes níveis no dossel. Nisso reside a explicação para o fato de uma superfície terrestre florestada poder evaporar tanto quanto ou até mais água que a superfície líquida de um oceano ou um lago, na qual 1 m² de superfície evaporadora coincide com apenas o mesmo 1 m² da superfície geométrica.

Corroborando esses fatos fantásticos, um estudo publicado recentemente no periódico científico *Nature*¹⁸ fez avançar o ciclo de descobertas sobre a importância extraordinária da vegetação global no processo de transferência de água para a atmosfera: quase 90%

¹⁶ Área da copa com raio de 10 m, 324,2 m² x 3,6 litros/m² = 1131,1 litros transpirados em um dia.

¹⁷ Área recente com floresta na bacia hidrográfica do rio Amazonas, - 5,5 x 10¹² m² x 3,6 litros/m² = 19,8 x 10¹² litros (~20 x 10⁹ toneladas); Área com floresta em toda Amazônia (sensu latíssimo Eva et al, 2005, A proposal for defining the geographical Boundaries of Amazônia), incluindo florestas úmidas, secas e inundadas = 6.280.468 km², ou 6, 280.468 x 10¹² m² x 3,6 litros/m² = 22,609.6848 x 10¹² litros (22,61 x 10⁹ toneladas); e projetada para a área histórica coberta com floresta (área com floresta em 2004 mais desmatamento corte raso até 2004, Alves 2007) = 6.943.468 km², - ou 6,943468 x 10¹² m² x 3,6 litros/m² = 25 x 10¹² litros (25 x 10⁹ toneladas).

¹⁸ vazão do rio Amazonas na foz de 2 x 10⁹ m³/segundo x 86400 segundos = 17,28 x 10⁹ m³/dia.

¹⁹ (Jasechko et al., 2013) Terrestrial water fluxes dominated by transpiration.

Na transpiração as plantas transferem para a atmosfera 90% de toda a água evaporada nos continentes.

de toda a água que chega à atmosfera oriunda dos continentes chegou lá através da transpiração das plantas, e somente pouco mais de 10% como simples evaporação sem mediação das plantas. Como essa transferência por transpiração se dá com grande absorção de calor na superfície, as antes insuspeitas plantas interferem – e muito – com a chuva, os ventos e o clima.

Todo esse movimento de água custa energia. Olhemos para um paralelo próximo. Para gerar a eletricidade de que tanto se necessita, fala-se muito em aproveitar a energia das águas na Amazônia. Ora, a energia hidráulica de queda nos rios somente existe porque a água foi elevada e transportada pela atmosfera para suas altas cabeceiras. A transpiração das árvores, como elo vital no ciclo das águas, absorve a energia solar no bombeamento da água do solo e na sua transpiração. Assim, as árvores funcionam como estações elevatórias, alçando e lançando as águas nas altitudes da atmosfera, águas que mais adiante retornarão ao solo como chuva, transferindo parte da energia solar embutida no vapor à energia potencial da água que enche os reservatórios das hidrelétricas.

1.2) Nucleação das nuvens: o pó de pirlimpimpim no oceano verde

Retornar volumes colossais de vapor de água para a atmosfera é somente a primeira parte da receita para ter

Potência climática da floresta

Quanta energia do Sol é consumida para evaporar 20 trilhões de litros de água ao dia? Para dar uma noção da grandeza de energia envolvida na transpiração amazônica, basta fazer uma comparação com as hidrelétricas. Evaporar um grama de água líquida consome 2.3 kilojoules de energia solar. Para converter isso em energia hidráulica/elétrica, imagine uma chaleira gigante que comporte esse volume d'água, daquelas que se liga na tomada elétrica. Quanta eletricidade seria necessária para ferver e evaporar toda essa água? A usina de Itaipu, com 14 mil megawatts de potência, precisaria gerar eletricidade em sua capacidade máxima por 145 anos para que a chaleira evaporasse a água equivalente àquela transpirada em apenas um dia amazônico. Ou, para rivalizar com as árvores amazônicas e fazer o trabalho em um dia, seria preciso somar a eletricidade de 50 mil usinas hidrelétricas como Itaipu (ou 200 mil como Belo Monte). Esta comparação deixa claro que, diante da potência climática da floresta, as maiores estruturas humanas se mostram microscópicas.

e manter chuvas copiosas e benignas. Em 1999, um dos primeiros estudos utilizando aviões e observações do satélite TRMM²⁰ feitos no projeto LBA constatou que, na Amazônia, o ar na baixa atmosfera (troposfera) é tão limpo de poeira quanto o ar sobre o oceano, onde as fontes de poeira são muito reduzidas, e que as nuvens típicas na Amazônia se pareciam muito com as nuvens marítimas. Essa inusitada semelhança inspirou aqueles pesquisadores a batizar a Amazônia de “oceano verde”²¹. Esse termo descreve as características oceânicas desta extensão continental coberta por densas florestas. A importância deste conceito novo e incomum reside na sua sugestão de uma superfície florestal, estendida abaixo da atmosfera, cuja características de vastidão, humidade e trocas pelos ventos se assemelham às dos oceanos reais.

Mas havia na semelhança um mistério, pois a maior

Oceano verde: a atmosfera amazônica possui o ar limpo como a atmosfera do oceano azul.

parte do oceano azul tende à aridez, com poucas chuvas, enquanto

no oceano verde as chuvas eram torrenciais e constantes. Tanto que, antes do avanço do desmatamento, dizia-se haver ali apenas duas estações, a úmida e a mais úmida. Agora surgiu uma estação seca pronunciada, e a duração da estação úmida diminuiu progressivamente²².

Nuvens são aglomerados de pequenas gotículas em suspensão no ar. Gotas visíveis se condensam a partir do vapor, que é invisível, pelo efeito da baixa temperatura. Mas somente temperatura não inicia o processo de condensação. É preciso haver também uma superfície sólida ou líquida que funcione como “semente” para que se inicie a deposição das moléculas de vapor. Essas sementes, ou núcleos de condensação, são em geral aerossóis atmosféricos: partículas de poeira, grãos de pólen ou de sal, fuligem e muitos outros.

Mas na atmosfera sobre a floresta oceano-verde os aerossóis são encontrados em baixas concentrações, como no azul. Se a limpeza do ar pode ser creditada por um lado ao efeito de tapete verde úmido da floresta segurando a poeira embaixo, e por outro à lavagem do ar pelas chuvas constantes, como explicar a formação de chuvas tão abundantes sem as sementes usuais para nucleação?

Estudando as trocas de gás carbônico através de torres de fluxo, cientistas brasileiros do INPA e da USP, e europeus da Holanda, Alemanha e Itália colaboraram no

²⁰ <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

²¹ (Williams et al., 2002) Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification.

²² (Marengo 2011) The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.

projeto LBA para investigar também as trocas de outros gases produzidos pelas plantas contendo carbono para verificar se constituíam parte importante dessas trocas. Esses outros gases são os aromas da floresta, também chamados de compostos orgânicos voláteis biogênicos (BVOCs²³). Como um vidro de perfume aberto perde seu líquido por evaporação e o gás-perfume difunde-se pelo ambiente, uma variedade de substâncias orgânicas evapora nas folhas e ganha a atmosfera.

Quando no ar úmido e com a luz do Sol, os aromas das plantas formam uma poeira finíssima com afinidade pela água. São os núcleos de condensação das nuvens.

Em termos de massa, as quantidades de carbono perdidas para a atmosfera por esses gases orgânicos são pequenas. Contudo, um grupo liderado por Meinrat Andreae, do Instituto Max Planck, que estuda a química dos gases na atmosfera, investigou o que acontecia com esses aromas quando misturados ao ar amazônico e desvendou o mistério da nucleação das nuvens²⁴. Os BVOCs (como isopreno, terpenos etc.), numa atmosfera úmida e na presença da radiação solar, oxidam-se e precipitam-se, formando uma poeira finíssima com afinidade pela água (higroscópica), gerando eficientes núcleos de condensação das nuvens. Poeticamente falando, esse é o *pó de pirlimpimpim* que surge magicamente no ar, carregado de vapor, e provoca as chuvas a cântaros das nuvens baixas, os regadores do Jardim do Éden. Enquanto os BVOCs estão na forma de gás, dissolvidos no

ar, a chuva não os lava. Só quando oxidam-se e precipitam-se como aerossóis formando as chuvas, é que são lavados. Mas sempre há mais BVOCs esperando para formar mais *pó de pirlimpimpim* para a próxima chuva.

Além da promoção de chuvas volumosas e gentis, outros mecanismos bioquímicos análogos aos que produzem os aromas, atuam como “vassourinhas químicas” da atmosfera. Nas condições amazônicas, poluentes perigosos (como o ozônio) são removidos do ar. Nos anos 1980, nos primeiros estudos de química da atmosfera empregando aviões instrumentados, constatou-se que o ar na baixa atmosfera amazônica continha menos ozônio (portanto era mais saudável) que o ar das regiões mais remotas da Terra (como a Antártida). Nas décadas subsequentes outros projetos de investigação indicaram o efeito das árvores na limpeza do ar²⁵. Desses e de outros estudos em desenvolvimento pode-se sugerir que as plantas amazônicas usam algum tipo de vitamina C, como um antioxidante, capaz de remover do ar gases danosos para a vida.

1.3) Bomba biótica de umidade: doar água para receber chuva

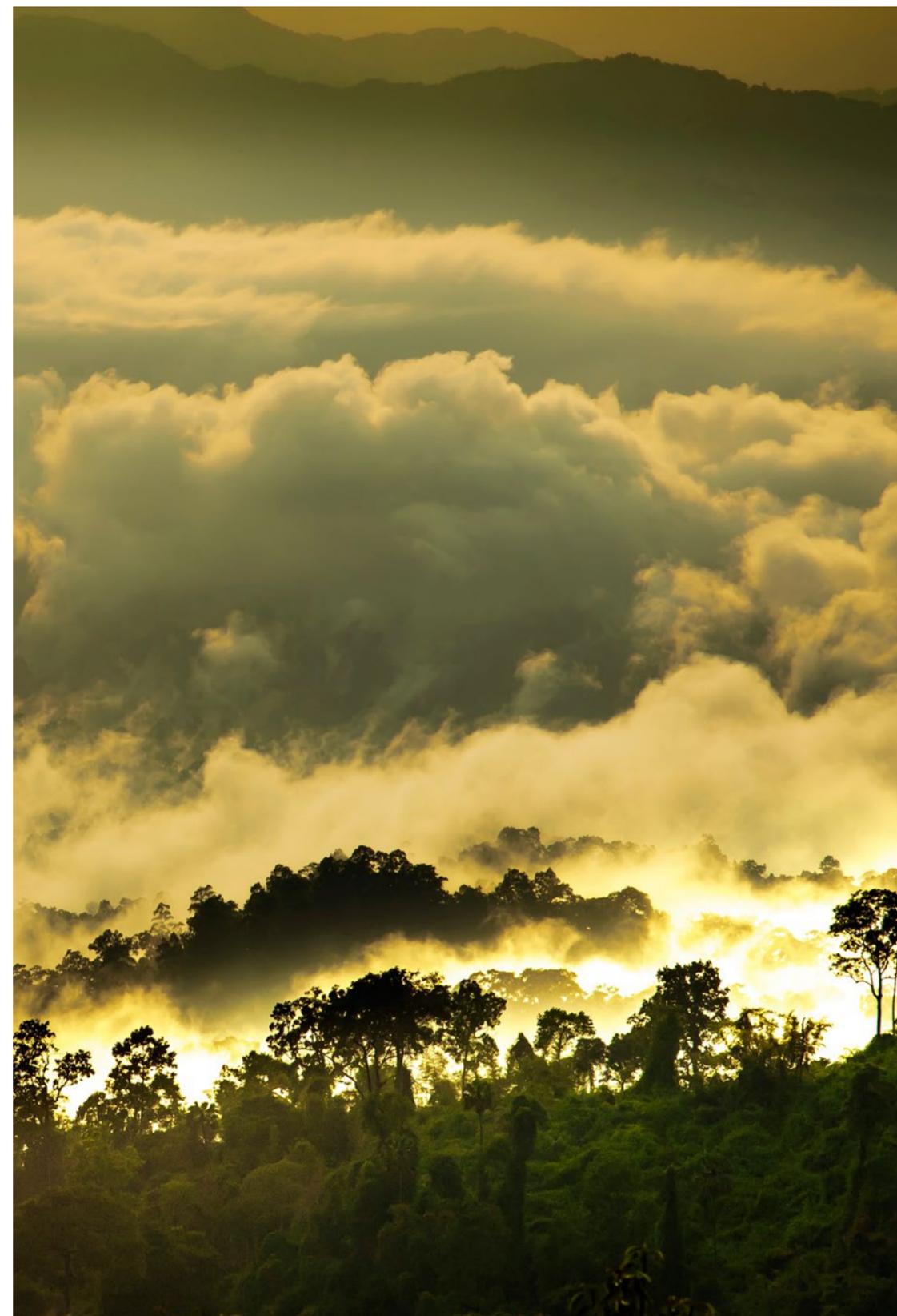
Por volta de 2005, no pico da mais poderosa seca a atingir a Amazônia até aquele momento, atuamos na integração dos primeiros seis anos de dados do projeto LBA²⁶. Depois de analisar em vários estudos as evidências das

23 Do inglês *Biogenic Volatile Organic Carbon*; são compostos biogênicos porque são sintetizados pelos organismos vivos, como os odores das plantas. Existem outros compostos orgânicos voláteis não biogênicos, chamados simplesmente de VOCs, como o solvente de uma tinta, por exemplo.

24 (Pöschl et al., 2010) Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon, (Clayes et al., 2004) Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene. Release: [Astonishing Discovery over the Amazonian Rain Forest](#).

25 Por exemplo (Rummel et al., 2007) Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia.

26 (Nobre, 2005) Is the Amazon Forest a Sitting Duck for Climate Change? Models Need yet to Capture the Complex Mutual Conditioning between Vegetation and Rainfall.



observações e os resultados de modelos, ponderei sobre a pergunta em voga à época: com o aquecimento global, irá a floresta úmida na Amazônia secar e morrer?

Ao longo de milhares²⁷, ou provavelmente milhões de anos²⁸, a floresta tropical da América do Sul evoluiu sua biota luxuriante sem sinais de ter sido desligada por eventos climáticos extremos, como aridez ou congelamento. No mesmo espaço de tempo, no entanto, é improvável que o impacto do clima externo ao continente tenha permanecido benigno, especialmente considerando as interferências cósmicas e sua conhecida relação com mudanças climáticas profundas em escala planetária²⁹.

Em face da adversidade climática externa, como este magnífico bioma conseguiu resistir à extinção? Hoje há linhas suficientes de evidências de que a biosfera não só pode resistir, mas, na verdade, pode alterar, modular e até regular seu próprio ambiente³⁰.

Uma região florestada, onde ocorre muito mais condensação em nuvens do que em superfície oceânica contígua, irá sugar para a terra os ventos do mar que, carregados de umidade, trarão chuvas para a área florestada.

As florestas tropicais da América do Sul estão entre os mais densos, diversos e complexos biomas terrestres no planeta. Do mecanismo de chuvas no oceano verde pode-se imaginar como essas florestas

poderiam regular o clima. Controlar a precipitação significa também controlar a convecção, o que, por sua vez, significa interferir com uma poderosa correia transportadora de massa e energia: a circulação de Hadley³¹. Através da regulação de chuvas, a biologia poderia definir o ritmo dos ventos alísios do Atlântico, arrastando a necessária umidade do oceano para o interior do continente.

Na mesma época, Victor Gorshkov e Anastassia Makarieva, aprofundando sua teoria sobre a regulação biótica do ambiente³², examinavam os mecanismos que ligam a transpiração das plantas com efeitos físicos na atmosfera. Das surpreendentes descobertas desta análise, eles desenvolveram a teoria da bomba biótica de umidade³³, revelando fisicamente como processos de transpiração e condensação mediados e manipulados pelas árvores mudam a pressão e dinâmica atmosféricas, resultando em maior suprimento de umidade do oceano para o interior de continentes florestados.

Makarieva e colaboradores descobriram que a condensação do vapor d'água na atmosfera gera uma redução localizada de pressão e produz potencia dinâmica que acelera os ventos ao longo do resultante gradiente de pressão³⁴. O ponto crucial da teoria é que contrastes na evaporação da superfície – casada com a determinante condensação nas nuvens – muito mais que contrastes

na temperatura de superfície, determinam a direção e a intensidade dos ventos trazedores de chuva.

Assim, uma região florestada, que evapora tanta ou mais água que uma superfície oceânica contígua – e que terá muito mais condensação na produção de chuvas –, irá sugar do mar para a terra as correntezas de ar carregadas de umidade, onde ascenderão, o que trará chuvas para a área florestada. Ao contrário, se a floresta for removida, o continente terá muito menos evaporação do que o oceano contíguo – com a consequente redução na condensação –, o que determinará uma reversão nos fluxos de umidade, que irão da terra para o mar³⁵, criando um deserto onde antes havia floresta.

Entre as previsões baseadas na teoria da bomba biótica feitas por Makarieva e Gorshkov, estava a de que as secas nas florestas nativas seriam contrapostas por transpiração vigorosa das árvores. Ora, essa previsão contrariava o senso comum, pois qualquer pessoa sabe que basta deixar um vaso com plantas sem regar por alguns dias, para que as plantas murchem e

Amazônia, coração do mundo

Como podemos entender a circulação da água pela paisagem? A água irriga e drena os solos de forma análoga ao sangue, que irriga e drena os tecidos do corpo. Se os familiares rios são análogos às veias, que drenam a água usada e a retornam para a origem no oceano, onde ficam as artérias do sistema natural? São os rios aéreos, que trazem a água fresca, renovada na evaporação do oceano. Para completar o sistema circulatório faltava somente o coração, a bomba que impulsiona os fluxos nas artérias aéreas. A teoria da bomba biótica veio explicar que a potência que propela os ventos canalizados nos rios aéreos deve ser atribuída à grande floresta, que funciona, então, como coração do ciclo hidrológico.

27 (Baker et al., 2001) The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years.

28 (Hooghiemstra et al., 2002) Evolution of forests in the northern Andes and Amazonian lowlands during the Tertiary and Quaternary.

29 (Berger and Yin, 2012) Astronomical Theory and Orbital Forcing.

30 (Foley and Costa, 2003) Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate; (Gorshkov et al., 2004) Revising the fundamentals of ecological knowledge: the biota–environment interaction; (Pielke and Avissar, 1998) Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate.

31 (Poveda and Mesa, 1997) Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena.

32 (Gorshkov et al., 2000) Biotic Regulation of the Environment: Key Issues of Global Change.

33 (Makarieva and Gorshkov, 2007) Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.

34 (Makarieva et al., 2013) Where do winds come from?

35 Já considerando e descontando os efeitos da circulação planetária associada a movimentos e acelerações inerciais.



até morram. Contrariava também o conhecimento de ecofisiologistas, segundo o qual quando para de chover e a água no solo diminui, as plantas fecham logo seus estômatos e deixam de transpirar para economizar água. Ao mesmo tempo, essa previsão fornece uma pista para um antigo enigma ecofisiológico: porque a fotossíntese evoluiu para ser “esbanjadora” de vapor d’água. Surpreendentemente, entretanto, Scott Saleska e colaboradores publicaram na revista científica *Science*³⁶ observações que corroboravam a correção da previsão teórica de Makarieva e Gorshkov.

Durante o pico da seca de 2005, as partes mais atingidas da Amazônia foram as que mais “verdejam”, isto é, na zona onde choveu menos (conforme registro do satélite TRMM) brotaram mais folhas novas nas copas das árvores (conforme foi visto pelo sensor MODIS no satélite Terra).

As conclusões desse estudo a partir de imagens de satélite já contavam com apoio de medições em terra das torres de fluxo do projeto LBA, que haviam constatado o fato de não ocorrer uma redução de transpiração das árvores nas épocas secas. Em outras palavras, parece que quando a seca chega, as árvores com raízes profundas (e acesso a grande quantidade de água subterrânea) executam um programa para manter ou aumentar a transpiração. Assim, com o fluxo de vapor da transpiração na superfície – e a correspondente condensação nas nuvens – mantém-se a sucção do ar úmido sobre os oceanos próximos, o que significa

continuar a importar água pela atmosfera – contrapondo a seca – e garantir a continuidade da floresta. A teoria da bomba biótica vem ganhando aceitação³⁷ e já tem comprovação observacional³⁸.

1.4) Rios aéreos: água fresca pelas artérias suspensas

Um mapa-múndi revela interessantes arranjos e simetrias na distribuição de florestas e desertos ao redor do globo, com três cinturões chamando a atenção: um de florestas ao redor da linha do Equador e outros dois de desertos, ao redor dos trópicos de Câncer e Capricórnio. Tal geografia de paisagens contrastantes tem explicação conhecida, a circulação de Hadley³⁹.

Pela influência da circulação de Hadley, a parte centro-meridional da América do Sul tenderia à aridez. Há maior incidência solar na zona equatorial e, portanto, ocorre ali, devido a efeitos físicos, uma maior ascensão de ar, que se resfria e faz chover, favorecendo florestas. O ar que subiu e perdeu umidade precisa ir para algum lugar, deslocando-se em altitude nos dois hemisférios na direção dos subtropicais. Esse ar seco, quando desce e se aquece, remove umidade da superfície, favorecendo desertos.

Mas existem exceções, e a parte centro-meridional da América do Sul é uma delas. Pela influência da circulação de Hadley, essa região tenderia à aridez. Basta ver o deserto de Atacama, no outro lado dos Andes, ou os

36 (Saleska et al., 2007) Amazon forests green-up during 2005 drought.

37 Por exemplo: (Sheil and Murdiyoso, 2009) How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis.

38 (Poveda et al., 2014) Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers.

39 [Célula de Hadley](#)

Rios Voadores: contando uma bela história

Em 2006, contemplando a floresta amazônica do alto de uma torre de estudo do projeto LBA, trocamos com o aviador Gerard Moss as primeiras ideias que levaram ao projeto de aventura, pesquisa, divulgação e educação ambiental Rios Voadores⁴². Com financiamento da Petrobras e a participação de Enéas Salati, o pioneiro dos estudos sobre reciclagem de umidade na Amazônia, além de outros cientistas de renome, Moss perseguiu por anos os rios de vapor com seu avião monomotor, coletando numerosas amostras para estudo e capturando a atenção lúdica das pessoas na aventura que criou. Fez também um trabalho extraordinário de educação ambiental nas escolas e pela Web, postando frequentemente em redes sociais as trajetórias dos rios voadores e mostrando como estes levam água para as pessoas. O resultado mais valioso desse projeto foi sua capacidade de tocar o lado emocional das pessoas através do estímulo lúdico, da aventura, da ciência engajada, conectando-as ao sentimento de estima pelo ambiente, pela água e pela floresta.

desertos de Namíbia e Kalahari, na África, e o deserto da Austrália. Todos alinhados latitudinalmente com a afortunada área verde, responsável por 70% do PIB do continente, no quadrilátero delimitado por Cuiabá, ao Norte, São Paulo, a Leste, Buenos Aires, ao Sul, e a cordilheira dos Andes, a Oeste.

As escolas ensinam que a água evapora do mar, “vai” para os continentes, cai como chuva, é coletada nos rios de superfície e retorna ao mar. Ao fazer a ligação entre evaporação da água no mar com seu trânsito em terra, esse conceito simplório do ciclo hidrológico não está errado, mas não explica quase nada. Por exemplo, por que existem desertos ou por que o vapor marítimo adentra os continentes de forma heterogênea.

Salati e colaboradores, comparando as assinaturas químicas⁴⁰ entre o fluxo de entrada de vapor oceânico no grande anfiteatro amazônico com as correspondentes assinaturas da água de escoamento que retorna ao oceano pelo rio Amazonas, perceberam que parte significativa da água que entrava como vapor no canal aéreo não retornava pelo canal terrestre⁴¹.

Daí concluíram que a Amazônia devia estar exportando esse vapor para outras regiões do continente e irrigando outras bacias hidrográficas que não a do Amazonas. Análises preliminares feitas à época nas águas de chuva coletadas na cidade do Rio de Janeiro detectaram sinais de que parte dela vinha do interior do continente, não do oceano contíguo. E, mais especificamente, que havia passado pela Amazônia. Esse grupo foi o primeiro a sugerir que chuvas na América do Sul fora da Amazônia poderiam ser alimentadas pelo transporte continental de vapor.

O conceito de rios atmosféricos foi introduzido em 1992 por Reginald Newell e Nicholas Newell⁴² para descrever fluxos filamentosos na baixa atmosfera capazes de transportar grandes quantidades de água como vapor, tipicamente em volumes superiores ao transportado pelo rio Amazonas (que tem vazão de 200 milhões de litros por segundo – ou 17 bilhões de toneladas ao dia).

Quase três décadas depois dos achados de Salati, a

Rios aéreos ligam os ventos alísios carregados de umidade do Atlântico equatorial com os ventos sobre a grande floresta, até os Andes, e daí sazonalmente para a parte meridional da América do Sul.

circulação que liga os ventos alísios carregados de umidade do Atlântico equatorial com os ventos sobre a grande floresta até os Andes, e daí sazonalmente para a parte meridional da América do Sul, foi descrita por José Marengo e colaboradores⁴³. Embora eles tenham chamado esse transporte de *jatos de baixos níveis*, o conceito é muito similar ao dos rios atmosféricos. Segundo sua explicação, funciona na América do Sul um sistema de monções semelhante ao da Ásia, e, devido ao efeito da floresta (*geisers* da floresta) e também da cordilheira dos Andes (uma barreira de 6 km de altura), o persistente ar úmido amazônico faz a curva no Acre e, durante o verão, leva quantidades generosas de vapor d'água para o quadrilátero afortunado, contrariando sua tendência para a aridez.

Recentemente Josefina Arraut⁴⁴ e colaboradores fizeram uma revisão climatológica dos rios aéreos da América do Sul, estimando o transporte de vapor associado e introduzindo um novo conceito, “lagos aéreos”, ou seja, região de remanso atmosférico com um estoque de vapor precipitável.

Com o conceito de rios aéreos estabelecido e tornando-se popular, Dominick Spracklen⁴⁵ e colaboradores desenvolveram uma nova abordagem ao correlacionar a superfície coberta por vegetação à exposição de uma

40 Definidas pelo uso de traçadores que portam assinaturas isotópicas. Diz-se que são isótopos dois ou mais átomos com o mesmo número de prótons mas com massas diferentes. Uma analogia boa é pensar em gêmeos com características idênticas, exceto peso. Assinatura isotópica é a relação numérica entre a imensa multidão de “gêmeos” atômicos em um material ou substância. A água pode conter variada combinação de gêmeos de oxigênio (¹⁶O e ¹⁸O) e hidrogênio (¹H, ²H), gerando moléculas de água com pesos distintos. A proporção destes gêmeos atômicos que ocorre na água do mar, por exemplo, se altera com a evaporação (flutuam primeiro os mais leves) e também com a chuva (precipitam primeiro os mais pesados). Assim, ao analisar a assinatura isotópica de uma amostra de água ou vapor, pode-se saber de onde ela veio, se do oceano ou da floresta.

41 (Salati et al., 1979) Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study; (Matsui et al., 1976) Isotopic hydrology in the Amazonia, 2, Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through ¹⁸O concentrations.

42 (Newell and Newell, 1992) Tropospheric Rivers? - A Pilot Study.

43 (Marengo et al., 2004) Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalysis: Characteristics and temporal variability.

44 (Arraut et al., 2012) Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America.

45 (Spracklen et al., 2012) Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests.

Eventos extremos: a vida buscando equilíbrio

Com o aquecimento global, ocorre maior acúmulo de energia na atmosfera, o que aumenta a probabilidade de ocorrências de fenômenos climáticos mais intensos. A natureza desta tendência foi prevista há décadas pelos meteorologistas. Mas a maior intensidade e frequência dessas ocorrências está sendo observada décadas antes do previsto. Algum fator na complexidade do clima deve explicar a aceleração dos efeitos. O registro geológico mostra que climas extremos já ocorreram na história da Terra, muito antes da humanidade surgir. Mas, ao contrário do que seria de se esperar depois dos cataclismos, todas as evidências apontam sempre para uma resiliente recuperação estabilizadora, atenuando os extremos. Sistemas puramente geofísicos não teriam essa capacidade. Somente a vida e seus processos de auto-regulação oferecem explicação satisfatória para a história climática da Terra.⁴⁹

parcela de ar num rio aéreo (medida pelo índice cumulativo de área foliar ao longo da trajetória) com chuva a jusante na trajetória daquela mesma parcela. Ou seja, um rio aéreo conecta regiões doadoras de umidade com outras receptoras de umidade. Daí a importância crucial das florestas a montante: constatou-se que a Amazônia é de fato a cabeceira dos mananciais aéreos da maior parte das chuvas na América do Sul.

1.5) Dossel rugoso: freio de arrumação nos ventos

Makarieva e Gorshkov⁴⁶ introduziram uma nova definição física para furacões, ciclones ou tornados: "... são implosões (explosões em reverso) que se passam em câmera lenta, decorrentes do desaparecimento volumétrico de vapor d'água na atmosfera por condensação"⁴⁷. Paulo Nobre

apresentou-lhes, então, um problema: "A questão que se coloca... é entender por que os furacões não se desenvolvem sobre as florestas tropicais, como na Amazônia, onde o fornecimento de vapor de água pela floresta e sua extinção, na forma de chuva tropical, é tão abundante."⁴⁸

Entre os serviços que a floresta presta ao clima, está um seguro contra eventos atmosféricos destrutivos, atenuando a concentração da energia nos ventos.

Respondendo, Makarieva e Gorshkov demonstraram teoricamente como uma grande área terrestre coberta por floresta não permite a formação de furacões e outros padrões climáticos anômalos, incluindo secas e enchentes. Em sua explicação, a fricção turbulenta local com o dossel da floresta -que transpira ativamente, o que resulta em chuvas uniformes sobre grandes áreas-, e a tração do vento pela bomba biótica em distâncias maiores diminui muito a chance de organização de tormentas como tornados ou furacões. As trajetórias registradas dos furacões comprovam o ambiente ameno nas regiões cobertas por florestas extensas e áreas oceânicas próximas⁵⁰. Ou seja, além de todos os outros serviços da floresta ao clima, ela ainda oferece um seguro contra destrutivos eventos atmosféricos, atenuando a concentração de energia nos ventos.

Outras funções clássicas das florestas na regulação do ciclo hidrológico em terra são bem conhecidas, como o favorecimento da recarga de aquíferos e a atenuação de enchentes⁵¹, entre muitas outras.

⁴⁶ (Makarieva et al., 2008) On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine.

⁴⁷ De acordo com os autores: "The driving force of all hurricane processes is a rapid release, as in compressed spring, of potential energy previously accumulated in the form of saturated water vapor in the atmospheric column during a prolonged period of water vapor evaporation under the action of the absorbed solar radiation." (Makarieva et al., 2014) Condensational power of air circulation in the presence of a horizontal temperature gradient.

⁴⁸ (Nobre P., 2009a) Peer Review Question Interactive comment on "On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine".

⁴⁹ (Gorshkov et al., 2000) Biotic Regulation of the Environment.

⁵⁰ Storm Track, mapa registrando todas as trajetórias observadas de furacões, mostrando que a regiões equatoriais das florestas e suas imediações oceânicas são livres destes fenômenos.

⁵¹ <http://www.ipef.br/hidrologia/mataciliar.asp>





2) O desmatamento leva ao clima inóspito

Em vista dos efeitos extensivos e elaborados das florestas sobre o clima demonstrados pela ciência, que resultados esperar da sua devastação? Para avaliar os impactos do desmatamento no clima vem sendo feito um número crescente de experimentos de campo e modelagem, estudos observacionais e, mais recentemente, análises teóricas. Quais as consequências projetadas do desmatamento e quais as já observadas?

2.1) Desmatamento virtual: simulando a aniquilação das árvores

Uma das maiores virtudes dos modelos climáticos está em sua capacidade de simular cenários distantes do momento presente. Esse tipo de exercício não é preditivo no sentido físico, mas onde a teoria física ainda não estiver disponível é o melhor conhecimento e a única ferramenta para analisar sistemas complexos e fazer extrapolações bem fundamentadas.

Tais exercícios de simulação são valiosos para situações específicas, como explorar riscos climáticos associados ao desmatamento. No ambiente virtual, como num simulador de voo, é possível avaliar repetidamente cenários de desastres, esmiuçando os fatores atuantes, as condições iniciais e as consequências potenciais de manobras arriscadas.

Em 1991, Carlos Nobre liderou um dos mais citados

estudos para simular o impacto no clima do desmatamento total da floresta amazônica⁵². Usando um modelo geral de circulação da atmosfera (GCM⁵³) com um módulo acoplado de representação da vegetação (SiB⁵⁴), os autores concluíram que, quando as florestas eram substituídas por pasto degradado no modelo, verificava-se um aumento significativo na temperatura média de superfície (cerca de 2,5°C) e uma diminuição da evapotranspiração anual (redução de 30%), da precipitação (redução de 25%) e do escoamento superficial (redução de 20%). Na simulação ocorria também um aumento da duração da estação seca na metade sul da bacia amazônica.

Nas duas décadas seguintes, outros estudos avançaram no detalhamento e generalização dessas conclusões. Deborah Lawrence e Karen Vandecar fizeram recentemente uma revisão da literatura⁵⁵ sobre os impactos do desmatamento tropical no clima e concluíram que vários GCMs concordam em que o desmatamento em escala regional leva a um clima mais quente e seco sobre a área desmatada. Os modelos que simulam o desmatamento completo da Amazônia preveem um clima com aquecimento na faixa de 0,1-3,8°C (média de 1,9°C) e redução de chuvas na faixa de 140-640 mm ao ano (média de 324 milímetros/ano, ou 10-15% de redução).

Mas o desmatamento pode ter implicações muito mais

⁵² (Nobre C. et al., 1991) Amazonian Deforestation and Regional Climate Change.

⁵³ Definição de GCM por Lawrence e Vandecar (2014): "... são modelos computacionais tridimensionais globais do sistema climático que operam em larga escala... Os modelos mais recentes incluem representações da atmosfera, oceanos e da superfície da Terra [...] e incorporam o ciclo hidrológico e uma representação explícita [...] da vegetação e seus efeitos sobre os fluxos de energia e de água, incluindo as transferências radiativas e turbulentas e os controles físicos e biológicos da evapotranspiração."

⁵⁴ (Sellers et al., 1986) Simple Biosphere Model.

⁵⁵ (Lawrence and Vandecar, 2014) The impact of tropical deforestation on climate and links to agricultural productivity, não publicado.

sérias. Em 1997, German Poveda e Oscar Mesa⁵⁶ propuseram o papel de ponte hidrometeorológica para a floresta amazônica ao conectar os dois grandes oceanos próximos, isto é, sugerindo efeitos climáticos cruzados entre os oceanos via atmosfera, mediados pela floresta.

Explorando com modelagem em direção similar, mais recentemente Paulo Nobre⁵⁷ e colaboradores estudaram o impacto do desmatamento na chuva amazônica, tendo como referência a inclusão ou a exclusão das respostas dos grandes oceanos aos cenários de desmatamento⁵⁸. Comparando simulações feitas em um GCM atmosférico usual com um GCM acoplado a outro modelo que simula as condições internas dos oceanos (salinidade, correntes etc.), esses autores encontraram uma redução consideravelmente maior na precipitação quando o GCM acoplado com o oceano foi rodado para um cenário de desmatamento total da Amazônia: 42% de redução da chuva contabilizando os mecanismos internos dos oceanos, contra 26% de redução da chuva sem considerá-los. Os oceanos sempre estiveram presentes, e a inclusão das suas respostas internas dá mais realismo às simulações.

Já existem comprovações de muito do que foi projetado pelos modelos como consequência do desmatamento, especialmente a ampliação da estação seca. Porém, esses experimentos virtuais indicavam um prolongamento da estação seca após destruição de 100% da floresta, o que já se observa com o corte raso de pouco menos de 19 % da floresta. Ou seja, esses

modelos parecem tender a subestimar as consequências negativas nos cenários simulados. Os resultados de projeções mais recentes incluindo os oceanos agravam o quadro e aumentam o alerta.

A eliminação da floresta – principal agente da condensação continental – equivale a desligar o interruptor de uma bomba de umidade atmosférica.

Mas é preciso também considerar a teoria da bomba biótica e sua previsão de redução de chuvas. Diferentemente dos modelos numé-

ricos convencionais, uma teoria física constrói entendimento baseada exclusivamente em leis fundamentais da natureza. Se a teoria estiver correta, torna possível prever quantitativamente efeitos físicos apenas com a análise dos cenários e de sua lógica funcional.

Makarieva e Gorshkov preveem que o desmatamento completo da Amazônia reduziria a precipitação, primordialmente como resultado da dissipação do efeito da baixa pressão (sucção) associado à condensação, que é conectada a uma redução da evaporação de superfície. Como a teoria da bomba biótica também credita a disponibilidade de vapor para a precipitação na Amazônia como resultado dessa capacidade de transpirar, a eliminação total do principal agente da transpiração levaria à cessação completa do bombeamento biótico.

Esta teoria sugere que, desligado o interruptor da bomba que puxa o ar úmido para o continente, o fluxo de umidade deve mudar de direção quando a condensação passar a ser relativamente maior sobre o oceano (mais

56 (Poveda and Mesa, 1997) Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena.

57 (Nobre P. et al., 2009b) Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation.

58 Que utiliza apenas a série histórica observada das temperaturas da superfície dos oceanos.



fraca que a biótica, a *bomba oceânica* de condensação está sempre ligada), o que levaria a aridez em terra⁵⁹.

Os modelos climáticos usados para simular o desmatamento ainda não embutiram essa nova teoria física, portanto não projetam esse efeito, que poderia significar até 100% de redução nas chuvas.

2.2) Desmatamento real: olhos de águia no espaço

O desmatamento real é imenso e seus efeitos sobre o clima são bem documentados. Estudos em torres micrometeorológicas mostram que a substituição de floresta por pastagem leva, como previsto pelos modelos, a um aumento da temperatura de superfície e uma redução da evapotranspiração⁶⁰. Observações de satélite mostram que, durante a estação seca, como previsto pela teoria da bomba biótica, a evapotranspiração das florestas continua a ocorrer ou até aumenta, mas não nas áreas desmatadas⁶¹.

Observações mostram que, durante a estação seca, como previsto pela teoria da bomba biótica, a evapotranspiração das florestas continua a ocorrer ou até aumenta, mas não nas áreas desmatadas.

Dados similares também indicam que a transpiração da floresta é bem maior do que aquela prescrita pelos modelos, o que explica em parte a subestima

mativa dos modelos de larga escala, no caso da redução de precipitação com o desmatamento. Embora alguns estudos observacionais tenham revelado um aumento

localizado da chuva com o desmatamento, estudos mais abrangentes, simulações com modelos climáticos e mesmo análises teóricas esclareceram o caráter local e transitório desse efeito, que depende basicamente da existência de matas circundantes à área desmatada e da extensão dessas matas. O aumento de chuva converte-se em redução tão logo as florestas remanescentes fiquem mais distantes que um certo limiar de área aberta. Daí em diante haverá redução das chuvas.

Dados de satélites para chuva e presença de floresta mostraram redução da precipitação a jusante dos ventos que passam sobre áreas desmatadas.

O estudo de Spracklen e colaboradores⁶² com dados de satélites para chuva e presença de floresta constatou que, com o desmatamento, ocorre a redução da precipitação a jusante dos ventos. Em 60% das áreas tropicais, o ar que passa sobre densas florestas produz pelo menos duas vezes mais chuva que o ar que passa sobre áreas desmatadas. Apesar de ainda não terem considerado o mecanismo e os efeitos da teoria da bomba biótica, esses autores demonstraram com evidências fortes que o impacto negativo do desmatamento no clima não é somente local, mas pode afetar regiões próximas e distantes.

Aplicando os conceitos da bomba biótica, Makarieva e colaboradores colocaram os achados de Spracklen em perspectiva, explicando quantitativamente quais os fatores físicos responsáveis pela redução nas chuvas a jusante dos ventos decorrentes do desmatamento.

Para a porção mais desmatada da Amazônia, já se constata progressivo retardo no início da estação úmida, o que gera significativo impacto no setor agrícola.

E apontaram que essa redução de chuvas poderá ser bem maior do que o indicado pelo grupo de Spracklen⁶³. Para a porção

mais desmatada da Amazônia, já se constata progressivo retardo no início da estação úmida, o que gera significativo impacto no setor agrícola.

Assim, a discussão sobre desmatamento passa longe de dúvidas sobre seus evidentes efeitos diretos e indiretos na redução das chuvas e recai sobre a extensão da área desmatada. No período 2011/2012, foram “apenas” 4.571 km² desmatados na Amazônia brasileira. Se comparado com taxas de desmatamento em anos de pico, como 2004 (27.772 km²), esse valor parece modesto. O Brasil merece reconhecimento por haver logrado essa redução. A velocidade e a eficácia atingidas na redução recomendam essa estratégia para zerar e reverter o desmatamento no Brasil e no mundo.

A despeito da notícia encorajadora, essa taxa, que parece tão pequena, seria suficiente para desmatar área equivalente a toda a Costa Rica em meros dez anos. Além disso, reduções nas taxas anuais atenuam a percepção momentânea de perda e mascaram o desmatamento acumulado na Amazônia, que é muito grave.

No que diz respeito ao clima, importa, sobretudo, a área total devastada e sua distribuição espacial. Compilando

59 Já considerando e descontando os efeitos da circulação planetária associada a movimentos e acelerações inerciais.

60 Por exemplo (Gash et al., 1996) Amazonian Deforestation and Climate; (von Randow et al., 2004) Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in southwest Amazonia.

61 (Huete et al., 2006) Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season; (Saleska et al. 2007) Amazon forests green-up during 2005 drought.

62 (Spracklen et al., 2012) Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests.

63 (Makarieva et al., 2013) Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure and atmospheric moisture content.



estudos pioneiros com dados de satélite, Diógenes Alves⁶⁴ contabilizou até 2004 um desmatamento total de 663 mil km². Agregando-se os números mais recentes do projeto PRODES do INPE, o desmatamento acumulado total até 2013 chega a 762.979 km².

Pelo viés do dano ao clima, o que se tem na Amazônia é um passivo gigantesco de destruição do oceano verde. Não há, portanto, qualquer motivo para comemorar as taxas relativamente mais baixas de corte raso dos últimos anos, mesmo porque, depois da aprovação do novo Código Florestal (2011), com sua ampla anistia a desmatadores, já se observa uma nítida tendência de aumento das taxas anuais.

Na contabilidade do INPE, o corte raso brasileiro (sem considerar os dos demais países da bacia amazônica) chegou em 2012 a 18,85% da área original de floresta⁶⁷. Mas a destruição não é uniforme, pois ocorre grande concentração de corte raso no chamado Arco do Fogo – ou Arco do Desmatamento⁶⁸. Se a vastidão raspada já é gravíssima para o clima, a situação torna-se ainda pior ao se considerar o oceano verde ferido.

A exploração madeireira e o desmatamento gradual produzem extensas áreas de florestas degradadas que raramente entram na contabilidade oficial da destruição, mas que, a depender das informações e estimativas disponíveis, podem ter impacto significativo sobre o clima.

64 (Alves 2007) Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon.

65 Área desmatada, 762.979 km² / 0,004136 km² = 184.472.679 de campos de futebol.

66 (Viana, 2012) Máquinas e Métodos de Desmatamento.

67 <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php> Lista (uma tabela) e Consolida (somatórios para a unidade de área considerada).

68 Porcentagem de área desmatada até 2012: TO 75%, MA 72%, RO 41%, MT 40%, PA 22% e AC 13%.

69 http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf

Desmatamento acumulado: 762.979 km²

Esse valor é maior que a soma das áreas de três estados de São Paulo, ou que as áreas somadas de duas Alemanhas ou de dois Japões. Uma unidade de área mais próxima do brasileiro, o campo de futebol (4.136 m²), dá uma noção da magnitude da devastação: 184 milhões de unidades⁶⁵ – quase um campo de futebol desmatado na Amazônia para cada brasileiro. Colocado na perspectiva temporal, teriam sido, em média, 12.635 campos desmatados por dia; 526 campos por hora; 8,8 campos – ou 36.291 m² por minuto; 605 m² por segundo, ininterruptamente, nos últimos 40 anos. Para caber na compreensão o gigantismo destes números é preciso estender a imaginação para além destas analogias. Um trator ficcional, operando uma lâmina frontal com 3 m de largura, precisaria acelerar quase à velocidade de um avião a jato (726 km/h) para desmatar a área raspada na Amazônia no ritmo registrado do espaço, em imagens. Como um trator desmata muito mais lentamente (0,24 - 0,36 ha/h⁶⁶, ou ~0,8 km/h se essa área estivesse contida em uma faixa com 3 m de largura), com a mesma lâmina de 3 m, seriam necessários mais de 900 tratores simultaneamente derrubando a floresta, lado a lado, formando uma frente destrutiva com quase 3 km de largura. Uma comparação ainda mais impressionante é uma “estrada de desmatamento,” com 2 km de largura, que daria para cobrir a distância da Terra até a Lua (380 mil km).

Dalton Valeriano liderou um estudo pioneiro sobre degradação⁶⁹ que encontrou no Estado do Mato Grosso, no período de 2007 a 2010, “somente” 7.856 km² com corte raso, mas outros 32.926 km² de florestas degradadas. Somando corte raso com degradação, sobrou pouco do propriamente chamado Estado de *Mato Grosso*.

No mesmo período, o INPE mapeou 64.205 km² de floresta degradada versus 39.026 km² de corte raso para a Amazônia brasileira. Usando a proporção entre estas

áreas, pode-se extrapolar a área de floresta degradada para toda a Amazônia brasileira. Na estimativa, até 2013 a área total degradada pode ter alcançado 1.255.100 km². Somando com a área mensurada de corte raso, o impacto cumulativo no bioma pela ocupação humana pode ter atingido 2.018.079 km².

Dentre mais de 200 países no mundo, somente 13 têm área maior que essa. Nesta contabilidade a degradação de florestas na Amazônia brasileira pode haver chegado a 29,44% da área original⁷⁰ que, somada ao desmatamento corte-raso, sugere que até 47,34% da floresta tenha sido impactada diretamente por atividade humana desestabilizadora do clima. Para a Pan-Amazônia, esse impacto agregado da Amazônia brasileira, contabilizando desmatamento e estimando degradação, representa de 26,68% a 29,03%⁷¹ sobre a área original de floresta.

Mas a área de impacto no sentido ecológico pode ser ainda maior, porque florestas contíguas a áreas de degradação ou corte raso sofrem direta e indiretamente os efeitos das mudanças ambientais vizinhas (biogeofísicas e biogeoquímicas)⁷².

No processo de degradação, a destruição do dossel, frequentemente superior a 60% da cobertura⁷³, muda as características estruturais, ecológicas e fisiológicas da floresta, comprometendo suas capacidades ambientais.

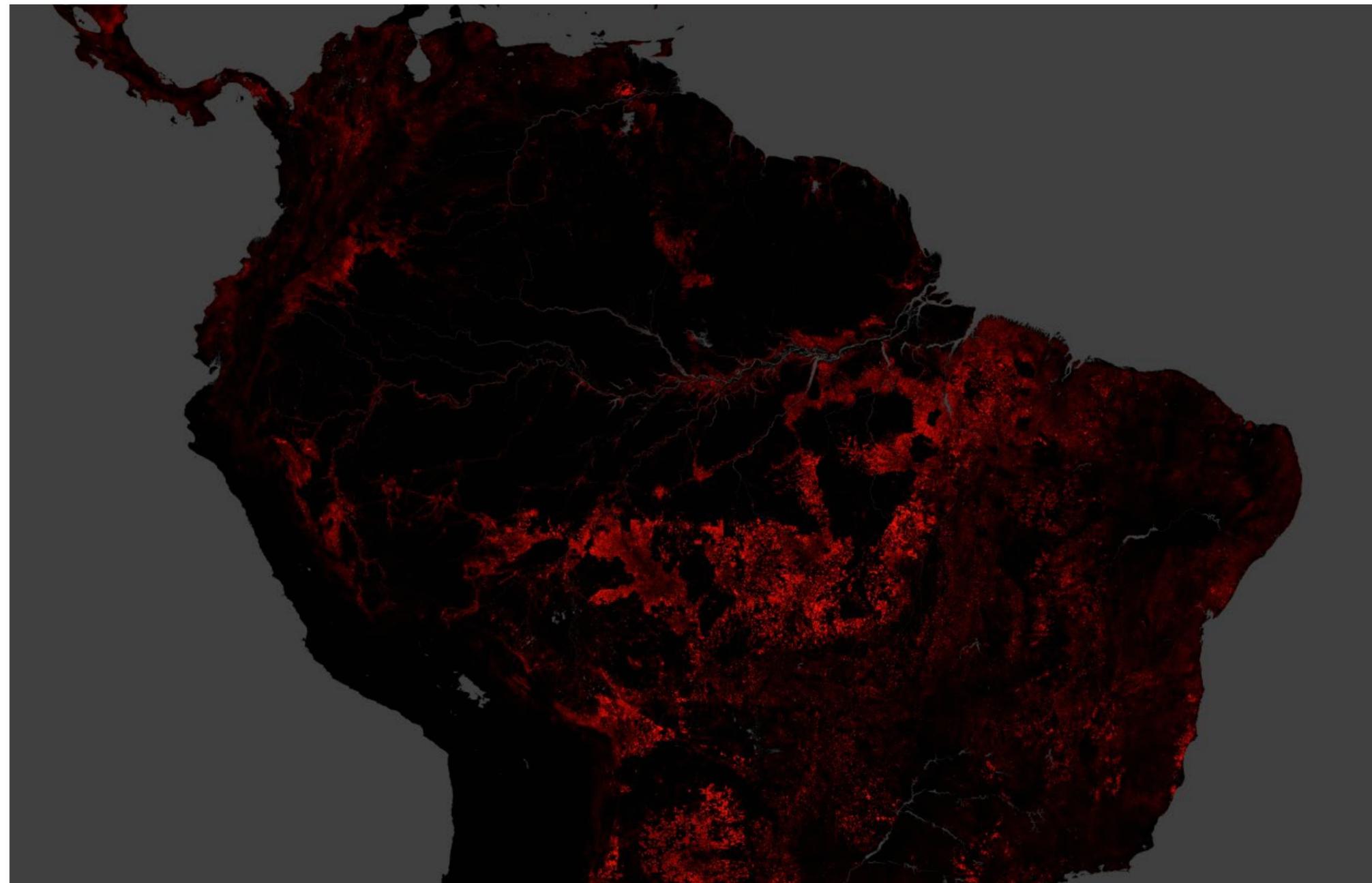


Figura 1 Desmatamento acumulado de 2000 até 2010 (vermelho forte) e anterior (vermelho mais fraco) na América do Sul⁷⁴.

70 Cálculo utilizando a mensuração de Espírito-Santo et al., (2014) para a floresta remanescente na Amazônia brasileira [3.500.000 km²], acrescida da área acumulada do desmatamento [762.979 km²], chegando a 4.262.979 km² de florestas originais na Amazônia brasileira.
71 Impacto usando área total de floresta original estimada pela cobertura atual (florestas remanescentes + desmatamento acumulado) baseado respectivamente em Espírito-Santo et al. (2014) com 7.562.979 km² e em Eva et al. (2005) com 6.943.468 km².
72 (Laurance & Williamson, 2001) Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon.
73 (Valeriano et al., 2008) Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites. Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e QUEIMADAS 2007-2008.
74 [University of Maryland Global Forest Cover.](#)



3) Amazônia e o calcanhar de Aquiles: o herói invencível tomba

A floresta sobreviveu por mais de 50 milhões de anos a vulcanismos, glaciações, meteoros, deriva do continente. Mas em menos de 50 anos, encontra-se ameaçada pela ação de humanos. Existe um paralelo entre a lenda grega do calcanhar de Aquiles e a importância da grande floresta amazônica para o clima da Terra. Como o herói grego, a Amazônia – essa assembleia astronômica de extraordinários seres vivos – deve possuir algum tipo de capacidade que a tornou uma guerreira invulnerável, por dezenas de milhões de anos, resistindo aos cataclismos geofísicos que assolaram o planeta.

Os achados quanto ao poder sobre os elementos da grande floresta, do condicionamento atmosférico umedecedor, passando pela nucleação de nuvens, à bomba biótica, revela e sugere mecanismos elaborados de invulnerabilidade. Onde estaria então o ponto fraco?

Resposta: na degradação e no desmatamento.

Como a grande floresta presta um rol determinante de serviços para a estabilidade do clima local, regional e global, sua ruptura física significa levar a “grande guerreira” à derrota nesses papéis, a exemplo da ruptura do calcanhar de Aquiles, que o fez perder a guerra. A flecha do inimigo é a motosserra, o correntão, o fogo, a fumaça, a fuligem e outros fatores de origem humana que surgiram do uso errado, descontrolado e terrível

das invenções do Antropoceno⁷⁵, a nova era em que a humanidade tornou-se uma força geológica capaz de mudar a face do planeta.

3.1) Ponto de não retorno: passo em falso no abismo

Se imaginarmos a metáfora de um veículo (a grande floresta) trafegando em estrada esburacada (clima), cujos pneus flexíveis absorvem e amortecem os impactos dos buracos (resiliência ecoclimática), qual seria a profundidade do buraco climático necessária para estourar o pneumático da Amazônia oceano-verde?

A floresta oceano-verde intacta tem muitos recursos para absorver os impactos de secas, regenerando-se completamente ao longo dos anos.

Em 2005, houve o impacto da estiagem mais severa em um século. Cinco anos depois, o impacto da

seca de 2010 foi bem maior e mais extensivo⁷⁶. Em 2010, emergiram pela primeira vez, nas rochas no fundo do rio Negro, pinturas rupestres feitas quando o nível dos mares estava mais de 100 m abaixo do atual, durante a era glacial de milhares de anos atrás. As explicações físicas para esses dois megaeventos são ainda inconclusivas, mas numerosas observações, em terra e do espaço⁷⁷, não deixam dúvidas sobre os danos e prejuízos registrados na floresta⁷⁸, indicando que o pneumático amazônico já apresenta sinais de fadiga, ou pelo menos cicatrizes significativas dos impactos sofridos.

⁷⁵ <http://www.anthropocene.info/en/anthropocene>

⁷⁶ (Marengo et al., 2011) The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.

⁷⁷ Por exemplo: (Brando et al., 2014) Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions; (Saatchi et al., 2013) Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy; (Fu et al., 2013) Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection; (Marengo et al., 2013) Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation; (Phillips et al., 2009) Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest; (Cox et al., 2008) Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution; (Hutyra et al., 2005) Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia.

⁷⁸ (Nepstad et al. 1999) Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire; Por exemplo: extensiva mortalidade de árvores, o que muda significativamente a estrutura da vegetação e aborta o mecanismo normal de regeneração em clareiras.

Em condições estáveis de oceano verde, a floresta tem amplo repertório de respostas ecofisiológicas para absorver os impactos de secas como essas⁷⁹, regenerando-se completamente ao longo dos anos. Mas o que se vê em áreas extensas, principalmente ao longo do Arco do Desmatamento, é uma “falência múltipla de órgãos” nos fragmentados remanescentes florestais e até em áreas mais contínuas⁸⁰.

Vários fatores deletérios combinam seus efeitos, de modo que secas resultantes de pressão externa fazem estrago maior do que o usual, reduzindo a capacidade de regeneração da floresta. O primeiro e principal desses fatores é o próprio desmatamento. Sem floresta, desaparecem todos os seus serviços para o clima, o que, por sua vez, afeta a parte de mata que restou. Remover florestas quebra a bomba biótica de umidade, debilitando a capacidade de importar ar úmido e chuvas para a região. No processo de remoção com queima, a fumaça e a fuligem causam pane no mecanismo de nucleação de nuvens, criando nuvens poluídas e dissipativas que não produzem chuvas⁸¹.

O desmatamento quebra o mecanismo das chuvas. Sem chuvas, a floresta torna-se inflamável. O fogo entra pela mata, queima raízes superficiais e mata árvores grandes.

A floresta oceano-verde é muito húmida para queimar, mesmo durante a época “seca”. No entanto, quando nenhuma

chuva cai na estação seca - algo que não costumava acontecer, mas agora está se tornando cada vez mais

comum -, o material orgânico no chão da floresta acaba secando além do limite em que se torna inflamável. O fogo entra na mata, queima raízes superficiais e mata árvores grandes⁸². Todos esses efeitos do desmatamento potencializam-se. Assim, rapidamente os inimigos humanos vão golpeando o calcanhar da guerreira. Quando ela tombará de vez? Vários estudos sugerem a resposta: quando ultrapassar o ponto de não retorno⁸³.

O ponto de não retorno é o início de uma reação em cadeia, como uma fileira de dominós em pé. Tombando o primeiro, tombarão todos os demais. O sistema vivo na floresta, brutalmente desequilibrado, saltará para outro estado de equilíbrio.

3.2) Savanização e desertificação: dano extensivo ou dano impensável?

Com o ressecamento, o fogo e a alteração da floresta, a savana passaria a ser favorecida pelo novo equilíbrio climático, em detrimento da floresta.

Equilíbrio estável é um estado parecido com o de uma bola dentro de uma bacia, que em condições normais sempre volta para a parte mais funda do recipiente. Com oscilações crescentes da bacia, a bola se movimenta cada vez mais perto das bordas. Quando o vigor do movimento da bacia impulsiona a bola para além da borda, esta salta para fora e deixa a bacia do primeiro equilíbrio para trás.



79 (Phillips et al., 2010) Drought-mortality relationships for tropical forests.

80 (Laurance & Williamson, 2001) Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon

81 (Andreae et al., 2004) Smoking rain clouds over the Amazon.

82 (Nepstad et al., 2004) Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis.

83 Por exemplo: (Nobre and Borma, 2009) “Tipping points” for the Amazon forest.

Em 2003, Marcos Oyama e Carlos Nobre lançaram a hipótese da savanização da Amazônia em seu estudo de modelagem usando um GCM e um modelo de equilíbrio de vegetação⁸⁴. Como o clima interage com a vegetação, ao mudar-se um, o outro tende a mudar em reatualização positiva (desestabilizadora) ou negativa (estabilizadora), até que surja um novo equilíbrio.

Clima e vegetação na Amazônia oceano-verde estão em equilíbrio estável e resiliente na condição úmida. Com o desmatamento, o clima muda gradualmente e se instabiliza até ultrapassar um ponto de não retorno (borda da bacia úmida). O sistema pode então saltar para outro equilíbrio (muito mais seco).

Segundo esse estudo, haveria dois estados possíveis de equilíbrio para a vegetação na Amazônia. Um correspondendo à distribuição atual de vegetação, onde a floresta tropical cobre a maior parte da bacia, e outro com a floresta tropical no Leste da Amazônia sendo substituída por savana. Com o ressecamento progressivo, a entrada de fogo e a modificação em larga escala da floresta, a savana passaria a ser favorecida pelo novo equilíbrio climático, em detrimento da floresta. No segundo estado de equilíbrio, mesmo áreas remanescentes de florestas não desmatadas desapareceriam como tal, virando savanas.

Esta hipótese indica que somente proteger a floresta que sobrar não impedirá seu desaparecimento subsequente por força da mudança climática no novo

equilíbrio. Tal perspectiva coloca sob nova luz a política de preocupar-se em preservar intactas apenas as designadas áreas de conservação.

Essas extrapolações em geral consideram cenários de redução relativamente modesta de chuva, sempre presumindo que a direção dos ventos não mudará muito sem a floresta. Nesse cenário, os ventos alísios carregando umidade do oceano continuariam a entrar pelo continente, e apenas certas trocas verticais sobre a Amazônia se alterariam.

Mas a teoria da bomba biótica, que explica como a potência dos ventos está relacionada à condensação, prevê que a redução significativa da evaporação/condensação em terra deve levar a profunda redução da convergência do ar sobre o continente associada a uma redução radical no saldo do transporte de umidade ou mesmo a sua possível reversão. Poderíamos comparar essa relação terra-mar com um cabo de guerra: o lado onde ocorrer maior condensação atmosférica, ganhará a disputa, puxando umidade para si. Assim, com a floresta, os ventos trazem umidade do mar para a terra; sem floresta, o ar atmosférico poderia cessar de convergir sobre o continente, o que significaria eliminar até 100% das chuvas. Zero de chuvas levaria a um deserto, não a uma savana.

O cenário projetado pelo modelo de Oyama e Nobre (e mais tarde detalhado por outros estudos)⁸⁵, já seria ruim o suficiente ao prever a savanização, com

aniquilação do tesouro da biodiversidade florestal. Mas na savana ainda há chuva, e a agricultura continua com alguma chance. Já a desertificação decorrente do desmatamento progressivo, prevista pela teoria da bomba biótica, aniquilaria tudo, inclusive a maioria das atividades humanas na Amazônia.

E fora da Amazônia? Como a maior parte da água que irriga o celeiro produtivo no quadrilátero da América do Sul meridional procede das florestas da Amazônia, o futuro clima do continente poderia secar consideravelmente, no extremo chegando a se assemelhar com o presente da Austrália: um imenso deserto interior, cercado em um dos lados por franjas de áreas úmidas próximas ao mar.

84 Usando as mesmas classes de vegetação do SSiB. (Oyama and Nobre, 2003) A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America.

85 Por exemplo: (Malhi et al., 2009) Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.



4) O futuro climático da Amazônia: já chegou

As mudanças climáticas na Amazônia e fora dela já batem à porta. Mas se os cenários catastróficos se materializarem ou não, e quanto tempo isso demorará, depende de muitos fatores difíceis de se prever, entre eles quanto da cobertura vegetal original terá sido modificada e com qual velocidade.

Acelerando o desmatamento e ultrapassando o ponto de não retorno, que parece estar próximo, estimam-se poucas décadas até o clima saltar para outro estado de equilíbrio⁸⁶.

Zerando o desmatamento e ocorrendo a regeneração da floresta, afasta-se a ameaça imediata para um futuro mais ou menos distante, tudo a depender da extensão de floresta oceano-verde remanescente e do tamanho das forças climáticas externas.

O que a ocupação humana da Amazônia deflagrou foi uma competição impensável. A corrida onde duas influências nefastas disputam o pódio na destruição final da maior e mais diversa floresta tropical da Terra: o desmatamento e as mudanças climáticas globais⁸⁷.

A floresta oceano-verde não perturbada tem capacidades inatas para resistir a impactos climáticos externos, como oscilação nas chuvas. Nos últimos dez anos, a maioria dos modelos climáticos concordou em atribuir alguma resistência da floresta ao impacto do

A floresta oceano-verde não perturbada tem capacidades inatas para resistir a impactos climáticos externos, como oscilação nas chuvas. aquecimento global. Ainda assim, existem incertezas sobre qual a resistência efetiva das florestas tropicais úmidas à ação direta do homem, o que torna difícil, a partir desses modelos, projetar uma data segura para a floresta extinguir-se por essa causa.

Falta de chuva: ameaça mortal para a Amazônia

Em 2000, Peter Cox e colaboradores do Hadley Center publicaram um impactante artigo na revista *Nature*⁸⁸. Pela primeira vez haviam unido um modelo geral de circulação da atmosfera com um modelo interativo de vegetação em que o ciclo do carbono era bem detalhado. Entre os resultados, o modelo projetava uma redução acentuada, progressiva e permanente da chuva na Amazônia, o que levaria à sua morte gradual. Com a floresta seca, entraria o fogo e seriam liberadas vastas quantidades de carbono, o que resultaria em piora acentuada do aquecimento global. Ou seja, pela primeira vez um modelo climático gerava um vaticínio terrível para a grande floresta. Catorze anos depois, o novo modelo do Hadley Center está similar aos demais. Já não suprime a floresta por efeito externo como antes⁸⁹. Não obstante, os efeitos do modelo original do Hadley Center afetavam a floresta pela redução de chuvas, como decorrência do excesso de CO₂ na atmosfera e seu resultante aquecimento. Mas erros na previsão de chuvas podem ocorrer nos modelos climáticos. E é justamente na redução de chuvas que está a maior ameaça à floresta. Se esses modelos não preveem corretamente a redução de chuvas, não colocarão a floresta em perigo. Como nenhum modelo climático atual incorpora os mecanismos e os efeitos previstos pela teoria da bomba biótica de umidade, principalmente nos potenciais efeitos das mudanças na circulação do vento (convergência de grande escala suprimida sobre a terra seca), suas projeções podem ser incertas. Podemos vir a descobrir no futuro que o modelo original do Hadley Center foi o único a prever – talvez não pelas razões certas – o futuro climático da Amazônia.

⁸⁶ (Coe et al., 2013) Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia.

⁸⁷ (Malhi et al., 2008) Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon.

⁸⁸ (Cox et al., 2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model.

⁸⁹ (Good et al., 2013) Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC.

De forma grosseira, – e sem considerar os efeitos debilitantes da degradação florestal – , pode-se extrapolar a história conhecida de desmatamento corte-raso - ~20% da cobertura florestal da Amazônia brasileira removida em 40 anos, com efeitos sobre o clima já salientes – e projetar outros 40 anos para remover mais 20%, totalizando 40% de corte raso acumulado, o número sugerido pelos modelos como o limiar climático⁹⁰. Mas os efeitos do desmatamento somam-se aos impactos do fogo, da degradação florestal e das mudanças climáticas, o que implica uma aceleração do cenário esperado.

Contudo, apesar de os modelos climáticos serem extrapolações bem fundamentadas e úteis, os climas passados podem não oferecer uma boa base para prever o futuro, especialmente quando se trata de sistemas complexos e quando os equilíbrios climáticos estiverem próximos da “borda da bacia”, na iminência de saltar para outro estado de equilíbrio. Saberemos com certeza quando o futuro chegar, mas seria irresponsável tão somente esperar.

A perturbação antropogênica, embora já extensiva e provavelmente demasiada, é o fator mais imprevisível numa projeção sobre o destino final da Amazônia. A razão simples é que temos o livre arbítrio. Se escolhermos continuar no ritmo “deixa-como-está-para-ver-como-é-que-fica” (*business as usual*), e principalmente se optarmos por não recuperar os estragos infligidos à grande floresta, a teoria sugere que o sistema amazônico pode entrar em colapso em menos de 40 anos. Os limiares

de desmatamento nos quais as simulações indicavam ruptura do sistema climático atual estão se aproximando. Os efeitos locais e regionais no clima já estão sendo observados muito antes do esperado, especialmente ao longo das zonas mais devastadas, mas também nas áreas mais afastadas que dependiam da floresta para sua chuva⁹¹.

O futuro climático da Amazônia chegou. A responsabilidade é nossa, sobre o que faremos com esse conhecimento.

Assim, pelas evidências de alterações, o futuro climático da Amazônia já chegou. Portanto, a decisão urgente e já tardia pela intensificação da ação não pode esperar, se é que existe ainda chance de se reverter o quadro ameaçador. O investimento feito na atividade científica na Amazônia rendeu frutos de informação rica, fundamentada e disponível. A responsabilidade é nossa sobre o que faremos com esse conhecimento.

4.1) Reciprocidade climática: o desmatamento acumulado cobra sua fatura

A farra do desmatamento sem limites está encontrando no clima um juiz que sabe contar árvores e que não esquece nem perdoa.

Com uma redução expressiva nas taxas anuais de desmatamento, o Brasil desponta como exemplo de país que fez parte da lição de casa em relação às mudanças climáticas. Para uma nação que passou 40 anos investindo pesado no descaminho ambiental, descumprindo a própria lei de proteção florestal, a redução do desmatamento não é conquista pequena.



90 (Sampaio et al., 2007) Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion.

91 (Sampaio et al., 2007)



Mas a redução de taxas anuais, embora essencial, assemelha-se a fechar com as mãos um buraco no fundo do bote inflável (clima), depois que a água vazada nos últimos 40 anos (desmatamento) já ameaça colocar o bote a pique.

A farra do desmatamento sem limites está encontrando no clima um juiz que sabe contar árvores e que não esquece nem perdoa.

O foco usual quando se discute o futuro do clima na Amazônia é o desmatamento futuro, ou quanto cortar da mata que sobrou. Injustificadamente ausente, o assombroso desmatamento acumulado do passado precisa voltar ao foco, pois é sobre ele que recai o principal da reciprocidade climática. Sem tratar da devastação passada, o assombro se converterá em assombração.

Com uma média diária em torno de 4 mm de água transpirada⁹⁵, o que equivale a 4 litros por m², a floresta é a parceira generosa do clima amigo. Removida, a transpiração despenca – se ainda chover – para 1 mm, no caso de pastagens⁹⁶, e menos ainda com a aridificação.

Adicione ao caldeirão de iniquidades o fogo, a fumaça e a fuligem, com seu efeito aniquilador sobre a floresta, as nuvens e as chuvas, e a maldição do clima

Guilhotina decepadora de árvores

Estima-se que o bioma amazônico tenha sustentado 400 ou mais bilhões de árvores com diâmetro à altura do peito, acima de 10 cm⁹². Distribuindo essa população de árvores por área, infere-se que o desmatamento corte-raso tenha destruído, somente no Brasil, mais de 42 bilhões de árvores nos últimos 40 anos⁹³. Enfileirados e considerando uma altura média de 15 m, os troncos destas árvores cobririam 635 milhões de km, ou quase 1700 vezes a distância Terra-Lua. Esse ritmo de destruição significa mais de 1 bilhão de árvores cortadas ao ano; quase 3 milhões ao dia; mais de 120 mil por hora; mais de 2000 por minuto; e 34 por segundo⁹⁴! E isso sem contar um número talvez ainda maior das árvores decepadas nas chamadas florestas degradadas. Nestas quatro décadas foram destruídas quase 6 árvores por cada habitante da Terra, mais de 200 por cada brasileiro. São essas árvores ausentes que são percebidas pelo clima, já que cada árvore dizimada representa, entre muitos serviços ceifados, menor evaporação da superfície.

inóspito terá sido a resposta justa da natureza para tanta destruição. O problema é que o “castigo” atinge a todos indistintamente, não só aqueles que desmataram e incentivaram o desmatamento, mas também a maioria das pessoas que foram e continuam sendo contra o desmatamento.

4.2) Ordem de urgência: antes tarde do que nunca

Para contemplarmos a dimensão do que precisa ser feito em relação ao futuro climático da Amazônia (e como consequência da América do Sul), imaginemos um futuro próximo no qual o Brasil fosse atacado por

92 Densidade populacional média de árvores (DAP > 10cm) na Amazônia (*sensu latissimo* Eva et al, 2005, A proposal for defining the geographical Boundaries of Amazônia) = 555 (±114) /ha, ou seja, 55.500 (±11.400) árvores km² (Feldpausch et al., 2011, Height-diameter allometry of tropical forest trees); área total coberta por dossel fechado na Amazônia em 2004 = 6.280.468 km² (Eva et al, 2005, incluindo florestas úmidas, secas e inundadas); área histórica coberta com floresta (área com floresta em 2004 mais desmatamento corte raso até 2004, Alves 2007) = 6.943.468 km² (pode ser maior se incluir desmatamento acumulado fora do Brasil); estimativa total mínimo de arvores no bioma amazônico original: 385.362.474.000 (±79.155.535.200).

93 O corte raso raspou 762.979 km² da cobertura original (somente no Brasil); estimativa de arvores eliminadas com o corte raso = 42.345.334.500 (±8.697.960.600).

94 Ritmo temporal de corte: 42.345.334.500 (±8.697.960.600) arvores cortadas em 40 anos; 1.058.633.363 (±217.449.015) ao ano; 2.900.365 (±595.750) ao dia; 120.848 (±24.823) por hora; 2.014 (±413) por minuto; 33,5 (±6,9) por segundo.

95 (von Randow et al., 2013) Inter-annual variability of carbon and water fluxes in Amazonian forest, Cerrado and pasture sites, as simulated by terrestrial biosphere models. (Marengo, 2004) Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget.

96 (Hodnett et al., 1996) Comparisons of long-term soil water storage behavior under pasture and forest in three areas of Amazonia.

uma poderosa nação inimiga com uma tecnologia secreta que emprega ondas perturbadoras emitidas por satélites para dissipar nuvens e, assim, reduzir as chuvas. A nação inimiga teria interesses comerciais ameaçados pelo sucesso do setor agrícola brasileiro. Sua arma mata-chuvas serviria para minguar as plantações que com eles competem, quebrando safras e fazendo os preços internacionais explodirem. Informados pelo nosso serviço secreto dos malfeitos daquele país sobre o nosso, qual seria a reação dos agricultores brasileiros? Qual seria a reação da sociedade e do governo? Com toda a humilhação que o ultraje impõe, não precisamos de clarividência para suspeitar que a reação seria imediata e poderosa.

A remoção de florestas não derrota somente a agricultura; falta de água afeta a produção de energia, as indústrias e a vida nas cidades.

Saindo da ficção e voltando à realidade, vemos que o ultraje contra o Brasil está em pleno curso sem qualquer envolvimento de nação estrangeira. Em uma guerra não declarada, nos últimos 40 anos centenas de milhares se dedicaram a exterminar as florestas.

A remoção das florestas, ameaçando as chuvas e o clima, não derrotaria somente a competitiva agricultura; falta (ou excesso) de água afeta a produção de energia, as indústrias, o abastecimento das populações e a vida nas cidades. Mas, diferentemente da Europa e dos Estados Unidos durante a Segunda Guerra, nós estivemos e permanecemos praticamente inertes em relação aos ataques sofridos, deixando que sigam, ano

após ano, a destruir o *berço esplêndido*. Quem são os que atentam contra o bem-estar da nação? Por que a sociedade não se levantou e nosso Exército não foi acionado em nossa defesa?

Para enfrentar a gravidade da situação, precisamos de uma mobilização semelhante a um esforço de guerra, mas não direcionada ao conflito. Em primeira instância é urgente uma “guerra” contra a ignorância, um empenho sem precedentes para o esclarecimento da sociedade, inclusive e especialmente daqueles que ainda se aferram ao grande erro de acreditar ser inócua a devastação das florestas. Entre eles, os que manejam motoserras, tratores com correntão e tochas incendiárias, e os grupos que formularam políticas públicas, financiaram, controlaram e deram cobertura legislativa, legal e propagandística aos comandos da devastação. Contudo, apenas uma minoria da sociedade esteve e ainda está diretamente envolvida na destruição de florestas. E é essa minoria que empurra a nação na direção do abismo climático.

Essa minoria desmatadora não é uniforme, mas sua cultura privilegia interesses arraigados numa visão de curto prazo, descompromissada com as consequências. Embotados pelos interesses imediatos, parecem ignorar que a supressão das matas possa colocar o clima em risco. Entretanto, diante das evidências, continuar com esse tipo de prática não se sustenta. Por isso, na medida em que compreendam que a destruição sistemática das florestas é um tiro em seu próprio pé,

Esforço de Guerra

Nas grandes ameaças a uma nação, as forças militares entram logo em prontidão. Depois do ataque japonês a Pearl Harbor, os Estados Unidos decidiram ser necessário entrar na Segunda Guerra Mundial. Em poucos meses montou um “esforço de guerra”, em que fábricas de automóveis passaram a produzir tanques e aviões de guerra, e outras fábricas não bélicas passaram a produzir munição, armamentos e outros materiais e equipamentos requeridos. Até à Amazônia chegou aquele esforço de guerra, com os soldados da borracha. Sem tal esforço concentrado e extraordinário, os Aliados não teriam vencido.

há chances de que tais agentes desmatadores sejam convencidos a mudar. A esperança é de que a eliminação da ignorância quanto à função essencial das florestas na geração do clima amigo haverá por si só de participar como vetor na conversão de desmatadores em protetores, e quiçá, até em restauradores das florestas. Muitos exemplos já existem onde essa conversão ocorreu, com grandes vantagens para todos os envolvidos⁹⁷.

⁹⁷ Em projetos como [Lucas do Rio Verde Legal](#), [Paragominas: de vilão a mocinho do desmatamento](#), [Y Ikatu Xingu](#) etc.



5) Florestas de oportunidades: cinco passos para recuperar o clima

Enquanto não ultrapassarmos o ponto de não retorno, existem umas poucas frestas de oportunidade para a ação reparadora. Este é o momento para engajar aquele vigoroso e saneador esforço de guerra na tentativa de reverter o desastre climático decorrente da destruição da floresta oceano-verde. Nessa direção, várias tarefas se impõem:

5.1) Popularizar a ciência da floresta: saber é poder

Floresta: quem conhece protege. É vital fazer com que os fatos científicos sobre o papel determinante da floresta para o clima amigo e o efeito do desmatamento na geração do clima inóspito cheguem à sociedade e tornem-se conhecimento corrente. Todos os esforços devem ser feitos para simplificar a mensagem sem deturpar-lhe a essência. Antes de tudo, deve-se falar para a sensibilidade das pessoas.

5.2) Zerar o desmatamento: para anteontem

Zerar o desmatamento no curto prazo é indispensável, se quisermos conter dano maior ao clima.

É preciso erradicar vigorosamente a complacência e a procrastinação com a destruição. Um nível adequado de rigor compara-se com o tratamento dado ao tabaco. Constatados os males ao ser humano e os prejuízos econômicos à sociedade, uma série de medidas foram adotadas para desestimular o tabagismo.

No que diz respeito ao desmatamento no Brasil, várias providências do governo federal iniciaram esse processo de controle e desestímulo. Resultados significativos foram alcançados. Mas é preciso ir mais fundo e chegar à raiz do problema. Ampliar as políticas do Executivo, mobilizar a sociedade para neutralizar ações desagregadoras do Legislativo, como a anistia dada a desmatadores no novo Código Florestal Brasileiro. Infelizmente, as discussões em torno do Código Florestal não incluíram as consequências climáticas do uso do solo.

Uma situação extraordinária requer medidas extraordinárias. Sempre é tempo de rever leis para adequá-las às demandas da realidade e da sociedade. Somente multar desmatadores, que mais adiante serão anistiados pela burocracia ou pelo Congresso, é receita de fracasso.

Outras vulnerabilidades do programa de controle do desmatamento incluem o estímulo de ciclos econômicos⁹⁸, a demanda crescente de mercados por madeiras e produtos agrícolas, a cobiça por terras e os vetores representados por estradas, hidrelétricas e outros programas de desenvolvimento, cujas debilidades de planejamento fomentam a invasão e ocupação de áreas florestadas⁹⁹. Para que o desmatamento seja efetivamente zerado, como é indispensável para conter dano maior ao clima, todos esses buracos precisam ser tapados com mobilização e articulação da sociedade e governo, estratégia, inteligência, visão de longo prazo e sentido de urgência.

⁹⁸ Picos de desmatamento em 1995 (29.059 km²) e 2004 (27.130 km²) deram-se no auge de forte desempenho da economia.

⁹⁹ (Laurance et al., 2001) The Future of the Brazilian Amazon.

5.3) Acabar com o fogo, a fumaça e a fuligem: chamem os bombeiros!

Quanto menos fumaça e fuligem, menor o dano à formação de nuvens e chuvas, menor o dano à floresta oceano-verde.

Todas as formas de ignição originárias de atividades humanas sobre a floresta precisam ser rigorosamente extintas. O fogo em áreas florestais, pastos e áreas agrícolas, próximas ou distantes da Amazônia, é um problema grave¹⁰⁰. Quanto menos fontes de fumaça e fuligem existirem, menor o dano à formação de nuvens e chuvas, portanto menor o dano à floresta oceano-verde. Dada a cultura do fogo ainda prevalente no campo, essa não será uma tarefa fácil, porém ela é fundamental.

Mas voltemos à comparação com o tabaco. Durante décadas, a indústria mascarou a realidade sobre os danos do fumo à saúde. Empregou elaboradas estratégias e muitos recursos no embaralhamento cognitivo, buscando desmerecer a ciência e confundir a sociedade. Mas a verdade triunfou. E algo que parecia impossível tornou-se tendência mundial irreversível. O mesmo percurso de banimento em relação ao fogo é facilitado pela existência de muitas alternativas à queima que podem ser empregadas com vantagens pelos produtores.

5.4) Recuperar o passivo do desmatamento: a fênix ressurgue das cinzas

Embora zerar o desmatamento seja tarefa obrigatória, inescapável e há muito devida, somente isso já não é

suficiente para reverter as ameaçadoras tendências climáticas. É preciso confrontar o passivo do desmatamento acumulado, começar a pagar o principal da enorme dívida ambiental com a floresta.

Embora o esforço de reflorestamento seja desafiador, é o melhor - e talvez único - caminho para desviar um risco maior em relação ao clima.

Mas como reconstruir uma paisagem devastada? Se fosse uma paisagem urbana, seria o caso de se retrabalhar com as estruturas e edifícios que demandariam penosa reconstrução, tijolo a tijolo, um esforço de anos. Já estruturas inertes da natureza, como solos, rochas e montanhas levam milhares, milhões ou até bilhões de anos para se compor ou recompor, fruto da ação de lentas forças geofísicas.

E a paisagem viva? Se a vida anterior não tiver sido extinta, isto é, se houver propágulos, esporos, sementes, ovos, pais e seus filhotes, uma força misteriosa e automática de reconstrução entra em ação. Os “tijolos” biológicos são os átomos, que unem-se nas moléculas, compõem as substâncias que constroem as células, articulam-se nos tecidos, aglomeram-se nos órgãos, constituem os organismos, povoam os ecossistemas, interagem nos biomas e cuja soma total é a biosfera.

Para uma ideia prática do que está implícito nesta ordem viva encadeada e automática, imaginemos como seria se pudéssemos dispor de bens modernos (da tecnologia humana), da mesma forma que o faz a natureza. Poderíamos encomendar um automóvel (espécie) que

viria em um módulo desenvolvidor (semente). Colocado em um vaso ao sol e regado por algumas semanas, cresceria o veículo.

Parece difícil? Acontece que essa tecnologia já existe, funcionando a todo vapor nos ecossistemas da Terra, desde a sua origem. Uma árvore portentosa, cujas habilidades físicas e bioquímicas para existir e sobreviver beiram a ficção, saiu inteirinha de uma simples e minúscula semente, tirando do ar e da terra os materiais para se formar.

Na perspectiva do clima, precisamos regenerar tudo que foi alterado.

Assim, a própria floresta nos oferece soluções mirabolantes para a reconstrução das paisagens florestais nativas, pois dispõe de engenhosos mecanismos para recompor-se a partir de sementes, ou cicatrizar-se, com o processo natural de regeneração das árvores em clareiras. Há uma coleção rica de espécies de plantas pioneiras que têm a capacidade de crescer em condições ambientais extremas. Essas plantas formam uma floresta secundária densa, criando, assim, condições para que a complexa e duradoura floresta tropical possa restabelecer-se por sucessão ecológica de médio e longo prazos¹⁰¹.

Entretanto, quando a área desmatada é muito grande, o processo natural entra em falência por não conseguir fazer chegar ao solo descoberto as sementes das pioneiras. Aí torna-se necessário o plantio das espécies nativas. Se ainda houver chuvas, a floresta se regenerará

100 (Koren et al., 2004) Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation.

101 (Nobre, 2006) Fênix Amazônica, Renascendo das Cinzas da Destruição. Proposta para a construção de um ecossistema de empreendimentos sustentáveis na Amazônia.

nas áreas replantadas. Uma coleção de árvores plantadas é melhor que o solo exposto, entretanto ainda está longe de reconstituir em toda sua complexidade a parte funcional do ecossistema destruído¹⁰².

Precisamos e devemos regenerar o mais extensivamente possível o que foi alterado. Somente a integridade do oceano verde original garantiu ao longo de eras geológicas a saúde benigna e mantenedora do ciclo hidrológico na América do Sul.

É preciso usar a paisagem de modo inteligente, zoneando as terras por suas potencialidades, vulnerabilidades e riscos.

Mas essa recomposição florestal implicaria a reversão do uso do solo em vastas áreas hoje ocupadas,

algo improvável na ordem atual. Não obstante, existem caminhos alternativos com chances de criar condições imediatas de aceitação. Trata-se de fazer um uso inteligente da paisagem, com aplicação de tecnologias de zoneamento das terras em função das suas potencialidades, vulnerabilidades e riscos¹⁰³.

A agricultura e outras atividades econômicas nas zonas rurais podem ser otimizadas, aumentando sua capacidade produtiva e liberando espaço para o reflorestamento com espécies nativas. Variados estudos da Embrapa mostram como intensificar a produção pecuária, reduzindo grandemente a demanda por área de pastos. Projetos como o Y Ikatu Xingu¹⁰⁴ e Cultivando Água Boa¹⁰⁵ demonstram como é possível a

associação de interessados dos vários setores na recuperação de matas ciliares e outras valiosas ações de sustentabilidade.

O caos climático previsto tem o potencial de ser incomensuravelmente mais danoso do que a Segunda Guerra Mundial. O que é impensável hoje pode tornar-se uma realidade incontornável em prazo menor do que esperamos. A China, com todos os seus graves problemas ambientais, já trilha esse caminho e tornou-se o país que mais refloresta. Restaurar as florestas nativas é a melhor aposta que podemos fazer contra o caos climático, uma verdadeira apólice de seguro.

5.5) Governantes e sociedade precisam despertar: choque de realidade

Em quinze dias, e usando trilhões de dólares, governantes de várias nações decidiram salvar os bancos na crise financeira de 2008.

Em 2008, quando estourou a bolha financeira de Wall Street, governos mundo afora precisaram

de apenas quinze dias para decidir usar trilhões de dólares de recursos públicos na salvação de bancos privados e evitar o que ameaçava tornar-se um colapso do sistema financeiro. A crise climática tem potencial para ser incomensuravelmente mais grave do que a crise financeira, não obstante as elites governantes vêm procrastinando por mais de quinze anos tomar decisões efetivas que desviem a humanidade do desastre climático. E essa procrastinação parece piorar



102 [Partners](#). People and reforestation in the Tropics: a network of education, research and synthesis.

103 Tecnologia aplicando o [Modelo HAND](#) de terrenos, desenvolvida no grupo de Modelagem de Terrenos do Centro de Ciência do Sistema Terrestre do INPE.

104 <http://www.yikatuxingu.org.br/>

105 <http://www.cultivandoaguaboia.com.br/>



com o tempo, mesmo a despeito da disponibilidade de vastas evidências científicas¹⁰⁶ e saídas viáveis, atraentes e criativas¹⁰⁷.

Embora seja urgente, o desmatamento zero ainda é colocado como uma meta a ser realizada no futuro distante.

Na Amazônia, o retardamento decisório está nos prazos dilatados para metas e ações que deveriam ser urgentes, mas emperram na burocracia impenetrável e impeditiva. Encontra-se também na demora no financiamento de projetos alternativos e benéficos e, principalmente, na lenta apropriação dos fatos científicos sobre a importância das florestas para o clima. Ignorar soluções inovadoras, disponíveis e viáveis de valorização econômica das florestas¹⁰⁸ é jogar o problema para frente. O desmatamento zero, que já era urgente há uma década, ainda é colocado como uma meta a ser realizada em futuro distante. Muito diferente portanto dos quinze dias usados para salvar os bancos.

As elites governantes ainda têm como mudar o curso dos acontecimentos. Por isso precisam ter a boa vontade e humildade de reconhecer o risco de colapso no sistema ambiental.

Vimos o primeiro esforço coerente e consequente para reduzir efetivamente o desmatamento na Amazônia brasileira ganhar *momentum* a partir de 2003, e seus resultados são visíveis, demonstrando que é possível ir mais longe. Mas a despeito das auspiciosas iniciativas e também de promessas importantes em projetos de carbono, estamos muito longe

daquele “esforço de guerra” requerido para enfrentar a degradação climática. Para avançar de maneira efetiva, outras iniciativas criativas e enérgicas são urgentes e necessárias.

Suficientemente documentados pela ciência, as mudanças climáticas globais e os ameaçadores impactos regionais e locais do desmatamento metem o pé na porta fechada da inação política, colocando pressão crescente sobre tomadores de decisão. Se o conhecimento científico qualificado, ou o princípio da precaução e o simples bom senso não lograram gerar reação adequada daqueles que detêm os meios financeiros e os recursos estratégicos, o choque das torneiras secas aqui, cidades inundadas acolá e outros desastres naturais há de produzir reação.

¹⁰⁶ (Edenhofer et al., 2014) IPCC WGIII AR5 SPM : Summary for Policymakers; (Agrawala et al., 2014) IPCC WGIII AR5 TS Technical Summary.

¹⁰⁷ Por exemplo: (Stern, 2007) Stern Review on the Economics of Climate Change; (Sukhdev, et al., 2009) [TEEB](#) - The Economics of Ecosystems & Biodiversity: Climate Issues Update.

¹⁰⁸ Por exemplo: (Meir et al., 2011) Ecosystem Services for Poverty Alleviation in Amazonia; (Trivedi et al., 2009) REDD and PINC: A new policy framework to fund tropical forests as global 'eco-utilities'.

Conclusão

Na grande floresta da Amazônia, a Terra guarda um de seus mais espetaculares tesouros: a profusão de vida que inala gás carbônico e exala oxigênio, transpira água, emite odores mágicos, remove gases tóxicos, pulsa e regula, umedece e faz chover, propõe ventos e alimenta rios aéreos, acalmado a fúria dos elementos, tornando amigo o clima próximo e também o mais distante. As sociedades abrigadas sob seu hálito doador de vida têm nela um cordão umbilical que sustém suas economias e lhes dá bem-estar. Por tudo isso, é necessário, desejável, viável e até lucrativo alterar o *modus operandi* da ocupação humana na Amazônia.

Há muitas alternativas para reviver a competência de convívio respeitoso com a floresta das civilizações ancestrais.

Embora as ações de salvacão propostas sejam todas requeridas para lograr o restabelecimento funcional da

regulação climática pela floresta, a novidade está em enfrentar o passivo de desmatamento com reflorestamento e restauração ecológica. Há muitas e excelentes alternativas para reviver a competência de convívio respeitoso (e tecnológico)¹⁰⁹ com a floresta das civilizações ancestrais¹¹⁰.

O esforço de guerra contra a ignorância e pela consciência da necessidade vital das florestas é a melhor estratégia para harmonizar a sociedade – começando pelos governantes – em torno do objetivo comum de recuperar o tempo perdido, criando chances reais de evitarmos o pior dos desastres climáticos. Entretanto, se a despeito da montanha de evidências científicas ainda não formos capazes de agir, ou se formos lentos demais, então é provável que tenhamos de lidar com prejuízos incompreensíveis para quem sempre teve sombra e água fresca providos graciosamente pela grande floresta.



109 (Balée, 2003) Native Views of the Environment in Amazonia.

110 (Heckenberger et al., 2003) Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland?

Epílogo: o prólogo de uma nova era

A mítica floresta amazônica é imensamente maior do que a humanidade consegue ver nela. Vai muito além de um museu geográfico de espécies ameaçadas guardadas em unidades de conservação e representa muito mais do que um simples depósito de carbono, referenciado como massa morta nos tratados climáticos.

A floresta é um espetacular parque tecnológico da natureza, um complexo vivo que forma uma poderosa e versátil usina de serviços ambientais. Qualquer apelo que se faça pela valorização da floresta precisa recuperar esse valor intrínseco. É preciso despertar a capacidade de espantar-se diante do gigantismo da biologia tropical em todas as escalas, desde a manipulação dos ínfimos átomos e moléculas até a interferência nos oceanos e na atmosfera global.

O que vemos de ações humanas sobre a floresta amazônica revela enorme inconsciência, tanto dos que estão envolvidos na sua destruição, quanto dos que vagamente desejam sua proteção. Cada nova iniciativa em defesa da floresta tem trilhado os mesmos caminhos e pressionado as mesmas teclas. Neste comportamento, insistimos no que Einstein definiu como a própria insanidade: “Fazer a mesma coisa sempre, de novo, esperando resultados diferentes.”

O abundante conhecimento científico, assim como outras formas acessíveis de percepção e entendimento já nos permitem resolver problemas empregando uma nova abordagem – iluminada, integrativa, propositiva e construtiva. Uma abordagem diferente, portanto, do pragmatismo reducionista e inconsequente que nos guiou até aqui¹¹¹.

Análises sérias e abrangentes mostram numerosas oportunidades para a harmonização da presença e dos interesses da sociedade contemporânea com uma Amazônia viva e vigorosa, reconstituída em suas múltiplas capacidades. Para chegarmos lá, é preciso compenetração e modéstia, dedicação e compromisso com a vida. Com os recursos tecnológicos disponíveis, podemos agregar inteligência à ocupação, otimizando um novo uso do solo que abra espaço para a reconstrução ecológica da floresta. Podemos também revelar muitos outros segredos ainda bem guardados da resiliente biologia tropical e, com isso, ir muito além de apenas compreender seus mecanismos.

Pioneira na percepção dessas possibilidades, Janine Benyus lançou em seu livro *Biomimética, a inovação inspirada pela Natureza*¹¹², uma revolução na ideia de conexão entre natureza e tecnologia. Apresentando a proposta de que os seres humanos deveriam copiar conscientemente

o gênio da natureza nas suas próprias criações, ela enuncia três princípios básicos dessa reaproximação:

- Natureza como modelo: estudar e inspirar-se nos sistemas da natureza, seus *designs* e processos para resolver problemas humanos.
- Natureza como medida: usar um padrão ou critério ecológico para julgar a correção de nossas inovações. Após 3,8 bilhões de anos de evolução, a natureza aprendeu o que funciona, o que é apropriado e o que tem durabilidade.
- Natureza como mentor: um novo modo de ver e valorizar a natureza, do qual surge uma era baseada não naquilo que podemos “extrair” do mundo natural, mas no que podemos aprender a partir dele.

Além desses, uma série de outros princípios que guiam o funcionamento da natureza apresentam potencial para resolver grande parte dos problemas atuais. Uma lista curta desses princípios listados por Janine Benyus constata que a natureza é propelida pela luz solar; utiliza somente a energia de que necessita; ajusta forma à função; recicla todas as coisas; recompensa a cooperação; aposta na diversidade; demanda conhecimento local; limita os excessos internamente; e aproveita o poder dos limites.

111 Visto por Einstein: “Não podemos resolver problemas empregando o mesmo tipo de pensamento que usamos ao criá-los.” O pragmatismo gerador de problemas não deve ser a saída para resolver esses mesmos problemas.

112 (Benyus, 1997) *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*.

Referências

- Alves D.S., 2007. Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon Tscharrntke T. et al., (eds), **The stability of tropical rainforest margins, linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation**, Springer Verlag Berlin, pp 493-512.
- Agrawala, S., Baiocchi, G., Bashmakov, I., Blanco, G., Bruckner, T., Bustamante, M., Clarke, L., 2014. **IPCC WGIII AR5 TS** Technical Summary.
- Andreae, M.O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A.A., Frank, G.P., Longo, K.M., Silva-Dias, M. a F., 2004. **Smoking rain clouds over the Amazon**. Science 303, 1337–42.
- Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M.J., Obregon, G., Marengo, J., 2012. **Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America**. J. Clim. 25, 543–556.
- Baker, P.A., Seltzer, G.O., Fritz, S.C., Dunbar, R.B., Grove, M.J., Tapia, P.M., Cross, S.L., Rowe, H.D., Broda, J.P., 2001. **The history of South American tropical precipitation for the past 25.000 years**. Science 291, 640–3.
- Balée, W., 2003. Native views of the environment in Amazonia, in: Selin, H. (Ed.), **Nature across Cultures: Views of Nature and the Environment in Non- Western Cultures**. Kluwer Academic Publishers, pp. 277–288.
- Benyus, J.M., 1997. **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. New York: William Morrow, 1997.
- Berger, A., Yin, Q., 2012. Astronomical Theory and Orbital Forcing, in: Mathews, J.A., et al. (Eds.), **The SAGE Handbook of Environmental Change: Volume 1**. pp. 405–425.
- Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., et al., 2014. **Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions**. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S. a, Totterdell, I.J., 2000. **Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model**. Nature 408, 184–7.
- Cox, P.M., Harris, P.P., Huntingford, C., Betts, R.A, Collins, M., Jones, C.D., Jupp, T.E., Marengo, J.A, Nobre, C.A, 2008. **Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution**. Nature 453, 212–5.
- Edenhofer, O., Madrugá, R.P., Sokona, Y., et al., 2014. IPCC WGIII AR5 SPM : **Summary for Policymakers Contents**. ONU - UNFCCC
- Espírito-Santo, F.D.B., Gloor, M., Keller M., et al., 2014. **Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance**. Nature. DOI: 10.1038/ncomms4434
- Eva, H.D., and Huber, O., (editores) 2005. **A proposal for defining the geographical Boundaries of Amazônia**. Synthesis of the results from an Expert Consultation Workshop organized by the European Commission in collaboration with the Amazon Cooperation Treaty Organization - JRC Ispra, Italy
- Feldpausch, T.R., Banin L., Phillips, O.L., et al., 2011. **Height-diameter allometry of tropical forest trees**. Biogeosciences, 8, 1081–1106, 2011
- Foley, J., Costa, M., 2003. **Green surprise?** How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. Front. Ecol. Environ. 1(1): 38-44
- Fu, R., Yin, L., Li, W., et al., 2013. **Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection**. Proc. Natl. Acad. Sci., 110, 18110–5.
- Gambini, 2000, **Espelho índio: a formação da alma brasileira**. Terceiro Nome Editora, 2000.
- Gash, J.H.C. et al, 1996. **Amazonian Deforestation and Climate**, 1st ed. John Wiley & Sons, West Sussex.
- Good, P., Jones, C., Lowe, J., Betts, R., Gedney, N., 2013. **Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models**, HadGEM2-ES and HadCM3LC. J. Clim. 26, 495–511.
- Gorshkov, V.G., Makarieva, A.M., Gorshkov, V. V, 2004. **Revising the fundamentals of ecological knowledge: the biota–environment interaction**. Ecol. Complex. 1, 17–36.
- Gorshkov, V.G., Makarieva, A.M., Gorshkov, V.V., 2000. **Biotic Regulation of the Environment: Key Issues of Global Change**. Springer Verlag.
- Heckenberger, M.J., Kuikuro, A., Kuikuro, U.T., Russell, J.C., Schmidt, M., Fausto, C., Franchetto, B., 2003. **Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland?** Science 301, 1710–4.
- Hodnett, M.G., Oyama, M.D., Tomasella, J., Filho, A.O.M., 1996. **Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia**. Amaz. Deforestation Clim. Chapter 3, 1–21.
- Hooghiemstra et al., 2002. Evolution of forests in the northern Andes and Amazonian lowlands during the Tertiary and Quaternary, in Guariguata M & G Kattan, eds. **Ecology of Neotropical Rainforests**. Ediciones LUR, Cartago, Costa Rica, 2002
- Huete, A.R., Didan, K., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, et al., 2006. **Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season**. Geophys. Res. Lett. 33.

- Hutyra, L.R., Munger, J.W., Nobre, C.A., Saleska, S.R., Vieira, S.A., Wofsy, S.C., 2005. **Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia.** *Geophys. Res. Lett.* 32, L24712.
- Jasechko, S., Sharp, Z.D., Gibson, J.J., Birks, S.J., Yi, Y., Fawcett, P.J., 2013. **Terrestrial water fluxes dominated by transpiration.** *Nature* 496, 347–50.
- Koren, Y.J., Kaufman, L.A., Remer, J.V., Martins, 2004. **Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation.** *Science*, 303, 5662, 1342-1345
- Laurance WF, MA. Cochrane, S. Bergen, et al., 2001a. **The Future of the Brazilian Amazon.** *Science*, 291, 5503, 438-439.
- Laurance, W.F., Williamson, G.B., 2001b. **Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon Conservation Biology.** 15, 6 p1529
- Lawrence, D., Vandecar, K., 2014. **The impact of tropical deforestation on climate and links to agricultural productivity.** University of Virginia. Unpublished manuscript
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Li, B.-L., 2008. **On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine.** *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 8, 17423–17437.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., 2007. **Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1013–1033.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D., Nobre, A.D., Li, B.-L., 2013. **Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics.** *Atmos. Chem. Phys.* 13, 1039–1056.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Nefiodov A.V. (2014) **Condensational power of air circulation in the presence of a horizontal temperature gradient.** *Physics Letters A*, 378, 294-298.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Sheil D., Nobre A.D., Bunyard P., Li B.-L. (2014) **Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content.** *Journal of Hydrometeorology*, 15, 411-426.
- Malhi, Y., Aragão, L., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., Mcsweney, C., Meir, P., 2009. **Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.** *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106, 20610–20615.
- Marengo, J.A., 2004. **Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget.** *Clim. Dyn.* 24, 11–22.
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.** *Geophys. Res. Lett.* 38.
- Marengo, J., Borma, L., Rodriguez, D., 2013. **Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation.** *Am. J. Clim. Chang.* 2013, 87–96.
- Marengo, J., Soares, W., Saulo, C., Cima, M., 2004. **Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability.** *J. Clim.* 17, 2261–2280.
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Soares, W.R., Alves, L.M., Nobre, C.A., 2011. **Extreme climatic events in the Amazon basin.** *Theor. Appl. Climatol.* 107, 73–85.
- Marques et al. 1977. **Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus.** *Acta Amazonica*, 7, 355-362
- Matsui et al., 1976. **Isotopic hydrology in Amazonia 2: Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through 180 concentrations.** *Water Resour. Res.*, 2(4), 781-785.
- Meir, P., Mitchell, A., Marengo, J., Young, C., Poveda, G., Llerena, C.A., Rival, L., Meneses, L., Hall, A., Betts, R., Farley, J., Fordham, S., Trivedi, M., 2011. **Ecosystem Services for Poverty Alleviation in Amazonia.** Global Canopy Programme
- Molion, 1975. **A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects.** Ph.D. thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes da Silva, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solorzano, L., Moutinho, P., Ray, D., Guerreira Benito, J., 2004. **Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis.** *Glob. Chang. Biol.* 10, 704–717.
- Nepstad, D.C., Verissimo, A., Alencar, A., et al., 1999. **Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire.** *Nature*, 398, 505-508.
- Newell, R., Newell, N., 1992. **Tropospheric Rivers? - A Pilot Study.** *Geophys. Res. Lett.* 12, 2401–2404.
- Nobre, A.D., 2006. **Fênix Amazônico, Renascendo das Cinzas da Destruição.** Proposta para a construção de um ecossistema de empreendimentos sustentáveis na Amazônia. report, preprint. não publicado.
- Nobre, A.D., 2005. **Is the Amazon Forest a Sitting Duck for Climate Change? Models Need yet to Capture the Complex Mutual Conditioning between Vegetation and Rainfall,** in: Silva Dias, P.L., Ribeiro, W.C., Nunes, L.H. (Eds.), **A Contribution to Understanding the Regional Impacts of Global Change in South América.** Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, São Paulo, pp. 107–114.
- Nobre, C., Borma, L., 2009. **“Tipping points” for the Amazon forest.** *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 28–36.
- Nobre, C., Sellers, P., Shukla, J., 1991. **Amazonian Deforestation and Regional Climate Change.** *J. Clim.* 4, 957–988.

- Nobre, P., 2009a. Peer Review Question Interactive comment on **“On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine”** by AM Makarieva et al. Atmos. Chem. Phys. Discuss 8669–8670.
- Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D.F., de Almeida, R. a. F., Giarolla, E., 2009b. **Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation**. J. Clim. 22, 5686–5697.
- Oyama, M.D., Nobre, C.A., 2003. **A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America**. Geophys. Res. Lett. 30, 2199.
- Phillips, O., Aragão, L., Lewis, S., Fisher, J., 2009. **Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest**. Science (80). 323, 1344–1347.
- Phillips, O.L., van der Heijden, G., Lewis, S.L., et al., 2010. **Drought-mortality relationships for tropical forests**. New Phytol. 187, 631–46.
- Pielke, R., Avissar, R., 1998. **Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate**. Glob. Chang. Biol. 461–475.
- Pöschl, U., Martin, S.T., Sinha, B., et al., 2010. **Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon**. Science (80) 329, 1513–6.
- Poveda, G., Jaramillo, L., Vallejo, L.F., 2014. **Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers**. Water Resour. Res. 50, 98–118.
- Poveda, G., Mesa, O., 1997. **Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena**. J. Clim. 2690–2702.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., 2012. **Review article of the current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change**. Cryosph. Discuss. 6, 2477–2536.
- Rummel, U., Ammann, C., Kirkman, G.A., et al., 2007. **Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia**. Atmos. Chem. Phys., 7, 5415–5435.
- Saatchi, S., Asefi-Najafabady, S., Malhi, Y., 2013. **Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy**. Proc. Natl. Acad. Sci., 110, 565–70.
- Salati, E., Dall’Olio, A., Matsui, G., J.R., 1979. **Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study**. Water Resour. Res. 15, 1250–1258.
- Saleska, S.R., Didan, K., Huete, A.R., da Rocha, H.R., 2007. **Amazon forests green-up during 2005 drought**. Science 318, 612.
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B.S., Cardoso, M., 2007. **Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion**. Geophys. Res. Lett. 34.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A., 1986. **A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models**. J. Atmos. Sci. 43, 505–531.
- Sheil, D., Murdiyarso, D., 2009. **How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis**. Bioscience 59, 341–347.
- Spracklen, D.V., Arnold, S.R., Taylor, C.M., 2012. **Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests**. Nature 489, 282–5.
- Stern, N., 2006. **Stern Review: The economics of climate change**. London: HM treasury.
- Sukhdev, P., Bishop, B., Brink, J., et al., 2009. **TEEB - The Economics of Ecosystems & Biodiversity: Climate Issues Update**
- Trivedi, M., Mitchell, A., Mardas, N., Parker, C., Watson, J., Nobre, A., 2009. **REDD and PINC: A new policy framework to fund tropical forests as global “eco-utilities”**. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 8, 012005.
- Valeriano, D. de M., Monteiro, A.M.V., et al., 2008. **Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites**. Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD E QUEIMADAS 2007-2008 INPE. Sao Jose dos Campos.
- Viana, E. de S., 2012. **Máquinas e Métodos de Desmatamento**. Monografia, Universidade Estadual de Goiás. 18p.
- Villa Nova et al., 1976. **Estimativa de evapotranspiração na Bacia Amazônica**. Acta Amazônica, 6(2): 215 - 228.
- Von Randow, C., Manzi, a. O., Kruijt, B., et al., 2004. **Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia**. Theor. Appl. Climatol. 78, 5–26.
- Von Randow, C., Zeri, M., Restrepo-Coupe, N., et al., 2013. **Inter-annual variability of carbon and water fluxes in Amazonian forest, Cerrado and pasture sites, as simulated by terrestrial biosphere models**. Agric. For. Meteorol. 182-183, 145–155.
- Williams, E., D. Rosenfeld, N. Madden, et al., 2002. **Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification**. J. Geophys. Res., 107, 8082, doi:10.1029/2001JD000380.

Expediente

Revisão e copidesque:

Jaime Gesisky e Moema Ungarelli – Green Editora e Comunicação

Design e Editoração Eletrônica:

Felipe Horst – www.felipehorst.com

Imagens:

Agência Brasil, André Villas Bôas/ISA, Antonio Nobre, Gerlando Lo Savio, Margi Moss, Meirat Andreae, Philip Davison e bancos de imagens.

REALIZAÇÃO



SUORTE INSTITUCIONAL



PARCERIA ESTRATÉGICA



SUORTE

