



Volume 2, Número 1, 2025

Da biosfera à tecnosfera: história evolutiva e crise civilizatória

From the Biosphere to the Technosphere: Evolutionary History and Civilizational Crisis

Maurício Fernando Bozatski¹

Antonio Inácio Andrioli²

Resumo: O presente artigo examina a trajetória evolutiva da Terra e da espécie humana sob a perspectiva dos fluxos de energia que conectam a biosfera e a tecnosfera. Partindo da origem cósmica da matéria e da formação do planeta, analisa-se como os processos biogeoquímicos deram origem à vida e como a evolução dos *Homo sapiens* transformou-se em força geológica capaz de reconfigurar o sistema terrestre. A transição da economia biológica da natureza para a economia técnica da industrialização é interpretada como um ponto de inflexão civilizatória, no qual o domínio humano sobre a energia se converteu em desequilíbrio ecológico. A partir dessa leitura histórico-natural, argumenta-se que a atual crise ambiental representa não apenas um fenômeno físico, mas um sintoma de ruptura metabólica entre sociedade e planeta. Conclui-se que a superação dessa crise exige a reintegração ética e científica da humanidade à biosfera, orientada por um novo paradigma energético e civilizacional dentro dos limites planetários.

¹ Professor Associado do Departamento de Filosofia da Universidade Federal do Mato Grosso, Campus Cuiabá. E-mail: bozatski@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0001-9344-0694>

² Professor do Programa de Pós Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável (PPGADR). E-mail: andrioli@uffs.edu.br / <https://orcid.org/0000-0002-3406-3953>

Palavras-chave: Biosfera; Tecnosfera; Evolução; Crise civilizatória.

Abstract: This article examines the evolutionary trajectory of Earth and the human species through the lens of the energy flows connecting the biosphere and the technosphere. Beginning with the cosmic origin of matter and the planet's formation, it analyzes how biogeochemical processes gave rise to life and how the evolution of *Homo sapiens* became a geological force capable of reshaping the Earth system. The transition from the biological economy of nature to the technical economy of industrialization is interpreted as a civilizational turning point in which human mastery over energy turned into ecological imbalance. From this historical–natural perspective, the current environmental crisis is understood not merely as a physical phenomenon but as a symptom of metabolic rupture between society and the planet. It concludes that overcoming this crisis requires the ethical and scientific reintegration of humanity into the biosphere, guided by a new energetic and civilizational paradigm within planetary boundaries.

Key-words: Biosphere; Technosphere; Evolution; Civilizational crisis.

1. Introdução

A história da Terra e da vida constitui uma narrativa contínua de transformação energética e material, que conecta os níveis cósmico, biogeoquímico e social em uma mesma linha evolutiva. O planeta que habitamos é o produto de processos termodinâmicos e cosmológicos iniciados há aproximadamente 13,8 bilhões de anos, quando as primeiras estruturas de matéria emergiram a partir da expansão do Universo. A formação do Sistema Solar, há cerca de 4,6 bilhões de anos, estabeleceu as condições astrofísicas necessárias para a emergência da Terra, um corpo planetário singular por apresentar uma combinação rara de temperatura, composição química e estabilidade orbital capaz de sustentar a vida.

Desde as primeiras formas de organização molecular até o surgimento dos organismos fotossintetizantes, a dinâmica do planeta foi progressivamente modelada pela interação entre energia solar, atmosfera e metabolismo biológico. A fotossíntese, ao converter energia luminosa em energia química, inaugurou a biosfera e alterou de modo irreversível a composição da atmosfera terrestre, possibilitando o surgimento de ecossistemas complexos e o desenvolvimento da diversidade biológica. Essa transição marcou a passagem de uma Terra puramente geológica para uma Terra biogeoquímica, autorregulada por ciclos metabólicos que asseguraram a estabilidade térmica do planeta por centenas de milhões de anos.

O aparecimento dos *Homo sapiens*, há cerca de 300 mil anos, insere-se nessa longa cadeia de transformações evolutivas. Diferentemente de outros organismos, a espécie

humana passou a intervir conscientemente sobre os fluxos de energia e matéria, transformando a paisagem natural em função de suas necessidades de sobrevivência e, posteriormente, de produção. A domesticação do fogo, das plantas e dos animais representa o início de uma nova etapa na história do planeta: a tecnogênese da civilização. A energia, antes apenas captada biologicamente, passa a ser controlada e redirecionada artificialmente.

A Revolução Agrícola e, em seguida, a Revolução Industrial, romperam os limites bioenergéticos da natureza. A conversão de energia fóssil em força motriz expandiu exponencialmente a capacidade produtiva humana, mas inaugurou também uma era de desequilíbrios sistêmicos. A tecnosfera, conjunto de sistemas industriais, urbanos e digitais criados pela humanidade, tornou-se uma força geológica autônoma, capaz de reconfigurar os ciclos planetários de carbono, nitrogênio e fósforo. Esse novo estado do planeta, definido por muitos cientistas como Antropoceno, caracteriza-se pela superação dos limites planetários e pelo colapso das dinâmicas de autorregulação que sustentaram a biosfera por bilhões de anos.

Assim, compreender a passagem da biosfera à tecnosfera implica reconhecer que a história humana é, simultaneamente, biológica e termodinâmica. O *Homo sapiens* emerge como espécie singular não apenas por sua racionalidade ou cultura, mas por ser o primeiro organismo a se tornar uma força planetária. O presente artigo propõe uma leitura integrada dessa trajetória, da origem da vida à industrialização, para discutir como a evolução natural converteu-se em crise civilizatória, e como a compreensão dessa continuidade pode orientar uma ética da sobrevivência dentro dos limites físicos e ecológicos da Terra.

2. A Terra que herdamos, o planeta que nos gerou

Indícios arqueológicos apontam que a espécie de humanóides mais bem sucedida ao longo da história evolutiva, nós mesmos, está caminhando pelo planeta há pelo menos 300 mil anos antes do presente (Callaway. 2017). A despeito da pergunta acerca de nossas origens, no sentido de saber o que nos tornou a espécie de humanos que somos hoje, as respostas podem ser subsumidas em dois grandes arquitetos de nossa existência: a evolução das espécies e o tempo.

Em nossos organismos traduzem-se e sintetizam-se bilhões de anos de movimentos evolucionários que remontam à própria criação do Universo em si, há aproximadamente 13,8 bilhões de anos. A estrela mais próxima de nós, que emite energia em forma de ondas

eletromagnéticas, possui exatamente o tamanho certo; está precisamente na distância adequada e se encontra perfeitamente na idade em que suas emissões de energia não são demasiadamente fortes, o que viria a gerar um campo inhabitável ao seu redor. O Sol possui aproximadamente 4,6 bilhões de anos e irradia constantemente para a Terra energia em forma de ondas de rádio, microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios-x e raios gama.

A Terra possui cerca de 4,54 bilhões de anos, e ostenta todos os elementos e fatores que aparentemente são imprescindíveis para a manutenção de formas de vida, das mais elementares até as mais complexas. Em sua história cosmológica e geológica, o planeta passou por ocorrências que a tornaram o que é hoje. Um acidente cósmico com uma *terra gêmea* (Warren, 2024) ocasionou a formação do núcleo do planeta e também foi responsável pela criação de nosso satélite natural. A existência da Lua possibilitou que a Terra tivesse uma rotação mais estável e, por sua inclinação e formato, passasse a ter tanto o movimento de rotação quanto de translação ocorrendo em órbitas sincronizadas e uniformes. O campo gravitacional da Lua ainda causa as marés oceânicas ao atrair a água e formar saliências nos lados próximo e distante da Terra, estabiliza a inclinação do eixo terrestre para manter as estações e o clima consistentes e, ao longo de bilhões de anos, tem gradualmente desacelerado a rotação da Terra, tornando os dias mais longos.

Ao longo de sua trajetória geológica, o planeta passou por quatro grandes eras evolutivas (Hadeano, Arqueano, Proterozóico e Fanerozóico) que, ao passo que possibilitaram o surgimento de formas de vida elementares, também passaram a ser moldadas por estes seres vivos que gradualmente tornaram-se naturais e adaptados ao macroclima terrestre.

No período Hadeano, que ganhou essa denominação em alusão ao Hades da mitologia grega, o planeta era inhabitável e sua crosta consistia basicamente de ferro fundido e vapores tóxicos.

No período Arqueano, a água, que vinha até o planeta trazida por cometas e corpos extraterrestres - i.e., de fora da Terra, ao estabilizar-se em sua forma líquida, foi se acumulando nas depressões e lugares mais profundos da crosta. A ocorrência da água foi determinante para que os primeiros seres primitivos e rudimentares pudessem surgir e evoluir numa Terra sem atmosfera. Assim, as condições para o surgimento da vida estavam todas presentes. Uma estrela próxima e estável emitindo radiação constante, elementos químicos em disponibilidade suficiente para gerar aminoácidos e atividade vulcânica que produzia o movimento destes elementos gerando reações químicas em larga escala (Rockström e Gaffney, 2021).

Deste modo, surgiu um grupo de seres primitivos, as arqueobactérias. A composição de uma arqueobactéria inclui uma parede celular sem peptidoglicano (composta

por glicoproteínas ou polissacarídeos), lipídios de membrana com ligações éter em vez de ésteres, e um genoma com cromossomos circulares. Por serem procariontes, não possuem núcleo nem organelas membranosas. Seu material genético e processos de transcrição e tradução se assemelham mais aos dos eucariotos do que aos das bactérias. E diferentemente de todas as demais formas de vida, as arqueobactérias não precisam de oxigênio para sobreviver, ao contrário, o oxigênio é letal para elas. Arqueobactérias, não obstante, podem ser encontradas até hoje vivendo em nosso planeta.

Depois de milhões de anos desse ambiente, as algas verdes e azuis surgiram por meio de processos evolutivos, e isso ocorreu porque as condições para sua existência na Terra foram possibilitadas pelos movimentos prévios. Inicia-se assim a era da fotossíntese que dispersou oxigênio para o ar. Estas cianobactérias, tal como foram denominadas, produziram uma transformação que mudaria radicalmente não apenas a constituição das rochas do planeta, mas também sua atmosfera e até mesmo a cor que o mesmo apresenta até hoje e que foi constatada por um impressionado Yuri Gagarin, em 12 de abril de 1961, enquanto orbita o planeta: a Terra é azul!

Existindo em grande quantidade no planeta, estes seres vivos passaram a aproveitar a energia emanada pelo Sol do espectro da luz visível e começaram a sintetizar o gás carbônico (CO_2) presente abundantemente na atmosfera devido à atividade vulcânica. Como resultado deste processo, o elemento residual do movimento de alimentação das arqueobactérias foi o oxigênio, que por suas características e propriedades físico-químicas, passou por ligações e formou o ozônio (O_3). O ozônio por sua vez ascendeu na atmosfera terrestre e começou a constituir a Camada de Ozônio, uma película de proteção natural que filtra a radiação solar, e por decorrência veio a tornar a energia recebida menos hostil, favorecendo assim que novas formas de vida surgissem. Este evento ficou conhecido como a *Grande Oxigenação* (Aiyer, 2022). E todo este processo desencadeou o surgimento de uma nova era que foi denominada Proterozóica.

Com a ascensão das cianobactérias, as arqueobactérias que eram repelidas pela presença do oxigênio passaram a habitar as camadas mais profundas de oceanos e as fendas e crateras presentes na crosta terrestre. A atividade das cianobactérias promoveu o resfriamento do planeta, a um nível em que toda a Terra tornou-se uma *bola de neve*. De acordo com Rockström e Gaffney (2021), o planeta possui três estados de temperatura média:

A estufa (Hothouse), quando não há gelo nos pólos e pouco ou nenhum gelo em qualquer parte da Terra.

A *casa de gelo* (Icehouse), quando é frio o suficiente para haver gelo nos pólos, tal como se encontra hoje e nos últimos milhões de anos. A casa de gelo possui dois estados estáveis: longas e frias eras glaciais profundas e períodos mais curtos e quentes chamados interglaciais.

A *bola de neve* (Snowball), quando o gelo avança em direção ao equador, cobrindo todo o planeta com uma camada de gelo de pelo menos 1 quilômetro de espessura em certos pontos. Durante esses períodos de bola de neve, a vida ainda resiste ao redor de remotas fontes hidrotermais no fundo do oceano.

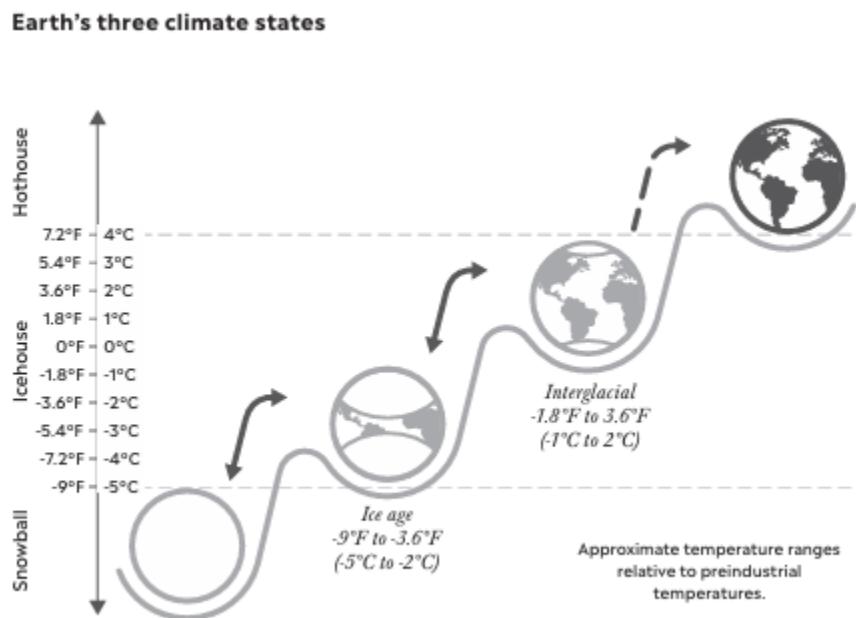


Figura 1: Os três macroestados climáticos do Planeta com base em sua temperatura média.
Fonte: Rockström e Gaffney, 2021.

A última fase quando tivemos um período de “bola de neve” terminou há aproximadamente 635 milhões antes do presente. Combinada com altos níveis de oxigênio na atmosfera, a transição extrema para fora desse estado criou as condições perfeitas para a diversidade genética. Os fósseis mostram que as variedades de vida na Terra explodiram tanto em diversidade quanto em complexidade há aproximadamente 542 milhões de anos antes do presente (Rockström e Gaffney, 2021).

A Era Fanerozóica é o período geológico atual do planeta. Se caracteriza por seres que evoluíram, ficaram complexos e puderam *caminhar* do mar para a superfície seca da Terra. Surgiram árvores que num processo de fixação começaram a criar a camada de solo na qual

microrganismos como fungos puderam evoluir. Animais passaram a poder viver neste novo habitat criado pelas árvores e a evolução foi tomando seu curso, moldando e sendo moldada pelas condições de vida que se apresentavam neste mundo novo em constante transformação. A evolução de plantas angiospermas apresentou a novidade de flores e frutos, que por sua vez oportunizaram o surgimento de insetos e animais herbívoros mais complexos.

O planeta quente e úmido e com uma megaflora foi o palco para o aparecimento dos dinossauros, que foi o grupo dos animais soberanos por milhões de anos. Contudo, a evolução foi dando forma a outros grupos de animais concomitantemente ao reinado dos dinossauros, animais tais como o *Adelobasileus*. O *Adelobasileus* é um pequeno mamífero, menor que um camundongo moderno, mas é um gigante evolutivo porque preenche a lacuna entre os cinodontes e as formas primitivas posteriores de mamíferos do período Triássico. É o proto-mamífero mais antigo conhecido. Devido ao seu pequeno tamanho, o *Adelobasileus* provavelmente tinha comportamento insetívoro, mas precisava manter-se fora do alcance dos dinossauros primitivos (Lucas e Luo, 1993).

Este pequeno protomamífero carregava consigo todos os elementos que podem ser encontrados em todas as espécies de mamíferos que vivem atualmente. Era placentário, ou seja, não botava ovos e gestava sua prole no interior do seu organismo. Era endotérmico e desta forma precisava regular sua temperatura constantemente entre 37 a 41 graus Celsius - característica comum a todos os mamíferos cuja temperatura corporal média varia dependendo da espécie. Possuía glândulas mamárias, o que implicava que deveria produzir a partir de seu próprio corpo o alimento de sua prole, i.e., o leite.

Num mundo povoado e amplamente controlado pelos grandes dinossauros, muitos deles carnívoros, quais seriam as chances de sucesso evolutivo de um animal desta ordem? Um animal que precisa metabolizar mais energia para controle térmico do próprio corpo, um animal que carrega dentro de si a própria prole, ou seja, se a fêmea estivesse gestante e viesse a ser devorada, seus descendentes inevitavelmente morriam junto com ela. Que precisa encontrar mais alimento para poder obter mais nutrientes para si e também para produzir o leite que alimentava os seus filhotes. Diante de tudo isto, evidentemente que as chances de sucesso evolutivo deste animal eram muito diminutas.

Contudo, há 66 milhões de anos antes do presente, a Terra foi visitada por outro corpo extraterrestre, um asteróide que percorreu o sistema solar sem colidir com os gigantes Urano e Netuno, nem foi contido pela Lua, e acabou por atingir a crosta terrestre. O impacto é confirmado por evidências muito sólidas, como a cratera que agora está totalmente coberta no fundo do mar, na costa do México. Ela possui exatamente a mesma idade da extinção dos

dinossauros não-avianos, que pode ser rastreada no registro geológico ao redor do mundo. O local do impacto, conhecido como cratera de Chicxulub, está centrado na atual Península de Yucatán, no México. Acredita-se que o asteroide tinha entre 10 e 15 quilômetros de largura, mas a velocidade de sua colisão causou a formação de uma cratera muito maior, com 150 quilômetros de diâmetro. É a segunda maior cratera do planeta (Osterloff, 2021).

Contra todas as possibilidades endógenas, sendo favorecidos pela visita deste viajante do Cosmos, as espécies mamíferas - cujas características biológicas pareciam ser pouco favoráveis para a vida junto aos dinossauros - herdaram a Terra. O impacto gerou uma pequena era glacial e os aspectos constituintes destas espécies proporcionaram que fossem os seres vivos mais bem adaptados para superar as radicais mudanças climáticas que enfrentaram.

Assim, o laboratório da evolução triunfou no grupo dos mamíferos. De baleias, que inicialmente evoluíram em terra seca e depois adaptaram-se para a vida nos oceanos, e hoje figuram dentre os maiores animais da Terra; até pequenos roedores, virtualmente onipresentes em todos os continentes e capazes de adaptações incomensuráveis e portadores de resiliências notórias.

Neste grupo evolutivo estão os grandes primatas, que se separaram em linhagens que deram origem aos *Hominidae*, aos chimpanzés e aos gorilas em momentos diferentes, com a separação mais antiga sendo entre orangotangos e outros hominídeos há cerca de 14 milhões de anos. Em seguida, houve a separação dos gorilas, há cerca de 8 milhões de anos. O cisma entre humanos e chimpanzés/bonobos é estimado em cerca de 5,5 a 6,3 milhões de anos atrás. A diferença genética entre a nossa espécie de *Homo sapiens* e a dos chimpanzés modernos atualmente é de ~10% a 15% do genoma, sendo a melhor estimativa prática usada por muitos autores com os novos genomas T2T: ~14 a 15% do genoma, quando somamos SNVs alinháveis + regiões não alinháveis/estruturais (Yoo, et. al. 2025).

O grupo dos hominídeos foi composto por aproximadamente 30 espécies distintas ao longo de sua evolução (Natural History Museum, 2025). Cada uma destas espécies apresenta um traço evolutivo característico que está presente em nossa própria espécie atualmente, os *Homo sapiens*.

O bipedarismo foi desenvolvido ainda no topo das árvores. A empatia e simpatia, características fundamentais para que fossemos uma espécie coletiva - ou como Aristóteles depois viria a nos descrever como sendo *zoon politikon*, animais coletivos -, foi fundamental para a sobrevivência da espécie num ambiente repleto de predadores superiores.

A criação de ferramentas e tecnologias, como as que proporcionaram a produção e controle deliberados do fogo, foi obra dos *Homo erectus*, há aproximadamente 2,5 milhões de anos antes do presente (Wrangham, 2009), e isso proporcionou uma virada no jogo evolutivo, pois os hominídeos deixaram de ser uma espécie passiva, suscetível às intempéries da natureza e presas relativamente fáceis na ordem natural, para se tornar a espécie dominante do reino animal.

O domínio de tais tecnologias também promoveu e orientou mudanças fisiológicas significativas para os hominídeos, que acabariam por resultar em intestinos menores e mais bem adaptados para o consumo de alimentos cozidos e, por outro lado, a indivíduos com cérebros maiores, beneficiados pelo excedente de energia produzida pelo organismo.

Em nossa herança genética é possível ainda encontrar traços do DNA de algum destes grupos de hominídeos com os quais convivemos e interagimos, mas que, todavia, entramos em competição, guerreamos e finalmente derrotamos. Atualmente somos a única espécie de hominídeos vivendo no planeta, não sofremos nenhuma evolução genética desde o nosso surgimento, há aproximadamente 300 mil anos antes do presente, e somos uma única espécie, uma única raça: os *Homo sapiens*, ou seja, os “humanos que sabem”, tal como nós mesmos nos intitulamos e nos auto descrevemos.

E somos, ao que tudo indica, a única espécie que é capaz de descrever cientificamente esse processo que nos produziu e também as leis gerais que organizam e dispõe a ordem de todo o Universo. Somos, portanto, produto do tempo e da evolução.

Mas é importante distinguir causação de correlação. Somos o produto correlato deste processo de formação do Universo, da formação da Terra e da evolução da vida no planeta, não somos sua causa. Estamos aqui *por causa* do planeta, não somos nós mesmos a causa de sua existência e da natureza que o preenche. Logo, é necessário que nos comportemos como tal, e não como se fossemos senhores de uma suposta criação direcionada a partir de uma imagem e semelhança celestial para que pudéssemos agir na Terra sem nenhum compromisso ético com a nossa morada, controlando toda a fauna e flora de acordo com os nossas intenções inventadas - tal como o capitalismo - e nos portando como seres dissociados do mundo natural.

O fato de sermos os animais com o neocôrtelex mais desenvolvido de toda a fauna planetária assegura-nos benefícios, tais como a habilidade de produzir ferramentas e a capacidade de desenvolver o conhecimento científico, contudo, justamente este mesmo aspecto impõe à nossa espécie a responsabilidade de nos comportarmos como se fossemos os

tutores de todo o mundo natural. Natureza esta que herdamos ao longo do tempo e que concomitantemente nos produziu por meio da evolução.

3. A dieta dos *Homo sapiens*

Todos os dias a Terra recebe uma quantidade de energia do Sol que pode variar de acordo com os processos pelos quais o mesmo passa constantemente. Também no trajeto de sua órbita elíptica e devido a inclinação de 23,5 graus, que é o aspecto que produz as diferentes estações do ano, a quantidade de energia recebida do Sol pode oscilar de uma região para outra, mas, em média, cada metro quadrado do planeta recebe anualmente 342 watts de energia solar (NASA, 2005).

Se armazenada numa bateria física, esta energia seria suficiente para manter acesa uma lâmpada de 100W por 3h25min. Quando considerada toda a extensão do planeta, a quantidade de energia solar recebida pela Terra ao longo de um ano é da ordem de 44 quatrilhões (4.4×10^{16}) de watts. Para se ter uma dimensão desta massiva quantidade de energia, a título de comparação, a Usina de Itaipú produz 84 trilhões (8.4×10^{12}) de watts anualmente, em sua capacidade máxima.

A Terra não fica com esta energia recebida do Sol armazenada em si, ela irradia toda essa quantidade de volta para o Espaço em forma de ondas de baixa frequência (ondas longas). E quanto mais energia a Terra recebe, mais ela esquenta, devolvendo para o Universo a energia em forma de calor. Esse balanço ou orçamento energético é a base fundamental da Entropia. E se a Terra não possuísse atmosfera - que teve sua formação iniciada naquele processo de atividade metabólica das cianobactérias - a temperatura média do planeta seria de -18° C. Todavia, os gases atmosféricos, os aerosols, os vapores de água e as nuvens, produzem aquilo que conhecemos como Efeito Estufa, que é o fenômeno físico que mantém a temperatura da Terra estável e em constante equilíbrio, aspecto imprescindível para a manutenção da vida.

Por sua vez, o Efeito Estufa, que se manteve em equilíbrio por milhões de anos e que foi a causa condicionante para o surgimento e florescimento da vida na Terra, pode ser desequilibrado por fatores que vão além dos movimentos naturais do planeta, ou seja, por causas antrópicas - a atividade das sociedades humanas. Enfatizando que a ordem humana não é natural, ela é inventada, tal como demonstra Yuval Noah Harari em seu *Sapiens* (Harari, 2020). No ano de 2024 a temperatura média global foi de 15,10°C (USP, 2025), um recorde

histórico e um grande problema para a manutenção do balanço energético, e que é causado em parte pela dieta adotada pelos humanos nas últimas décadas desde a industrialização.

Além da atmosfera que cria as condições climáticas necessárias, a vida precisa metabolizar sua própria energia - metabolismo significa exatamente este processo de produzir energia e ocorre por meio do catabolismo e do anabolismo. Um grande grupo de seres vivos, dentre os quais as próprias cianobactérias, as algas e as plantas, metabolizam sua própria energia aproveitando a luz solar. Com a adição de água (H_2O) e gás carbônico (CO_2), estes seres vivos podem obter sua própria energia por meio de um processo conhecido como *fotossíntese*. Existe ainda um grupo de seres vivos tais como as nitrobactérias, as ferrobactérias e as sulfobactérias que obtém sua energia não pela utilização da luz solar, mas, através da quebra de elementos químicos, neste caso o processo é conhecido como *quimiossíntese* e é fundamental para a fixação de nutrientes no solo.

Do ponto de vista metabólico, estes seres são conhecidos como *autótrofos* e são eles que sustentam a base de toda a cadeia alimentar. No que diz respeito ao aspecto de metabolizar energia, todos os demais seres vivos do planeta são classificados como sendo *heterótrofos*, ou seja, obtêm nutrientes e energia necessários para a manutenção da vida consumindo outros seres vivos. Os únicos alimentos que os seres heterótrofos podem consumir que nunca estiveram vivos são o leite e o mel.

Especificamente quanto a dieta destes animais heterótrofos, ela pode variar amplamente e é definida pelo próprio aparelho digestivo e fisiologia comum a cada espécie. Existe o grupo de herbívoros que se alimentam diretamente dos seres autótrofos (plantas, bactérias e algas). Estes herbívoros dividem-se em folívoros, que comem folhas. Frugívoros, que se alimentam de frutos. Granívoros que são os que comem grãos e sementes. Os nectarívoros, que consomem néctar de flores. E ainda os rizóforos/tuberívoros, que se alimentam de raízes e tubérculos.

O outro grupo de heterótrofos é composto pelos carnívoros, que obtêm seus nutrientes de forma secundária, ou seja, de outros animais. Estes dividem-se em predadores, que caçam e matam suas presas. Necrófagos que se alimentam de carcaças. Insetívoros, que comem apenas insetos. E piscívoros, que se alimentam de peixes.

Por fim, outro grande grupo de seres heterótrofos são os onívoros. Onívoros comem tanto alimentos de origem animal quanto vegetal. E é neste grupo que se encontram os *Homo sapiens*. “Os seres humanos são constitucionalmente onívoros. Isso é evidente não apenas pelas propensões alimentares predominantes, mas também por considerações muito mais substantivas de anatomia e fisiologia.” (Katz, 2019). Há ainda outras categorias específicas

como os detritívoros que se alimentam de matéria orgânica em decomposição. Os coprófagos, que comem fezes de outros animais (reciclam nutrientes). Os parasitas, são os que se alimentam de outros seres vivos sem matá-los, contudo, prejudicando-os. E os hematófagos que se alimentam de sangue.

A alimentação não proporciona apenas a energia que compõem o metabolismo, e assim impulsiona processos vitais como respiração e movimento, ela também fornece os micro e macronutrientes que constroem e reparam os tecidos (ossos, músculos, pele, órgãos, etc), isto significa que a alimentação não é uma opção, trata-se de uma necessidade inexorável e inescapável.

Os macronutrientes dividem-se em 3 grupos, a saber, proteína, gordura e carboidratos. Eles devem figurar como a grande porção da dieta diária, pois são os principais responsáveis pela manutenção de vários sistemas, como respiração, manutenção da temperatura corporal e recomposição celular. São dos macronutrientes que obtemos energia para nos movimentarmos e para manter o bom funcionamento do cérebro e de todos os sistemas fisiológicos.

Os micronutrientes são do grupo das vitaminas e dos minerais, e o corpo humano depende da ingestão de macronutrientes numa escala muito maior do que dos alimentos deste grupo. Mas a ausência de micronutrientes pode levar a consequências graves. A Organização Mundial da Saúde (OMS) sugere que a deficiência de micronutrientes é responsável por algumas das deficiências nutricionais mais comuns, como anemia (falta de ferro), raquitismo e osteoporose (falta de vitamina D), todas elas capazes de causar efeitos debilitantes no bem-estar e no desempenho do corpo. Podemos obter a maior parte das vitaminas e minerais a partir de plantas. Os alimentos de origem vegetal apresentam diversas cores e tonalidades, e sua coloração está relacionada aos nutrientes que contêm. A cor laranja geralmente indica a presença de vitamina A; Os alimentos roxos indicam antioxidantes; Os verdes contêm vitamina K e ferro; e os vermelhos são ricos em vitamina C. Portanto, uma dieta colorida proporcionará uma ingestão variada de nutrientes. (Lambert, 2022).

E quanto devemos comer? A quantidade total de calorias que uma pessoa necessita por dia não é uma medida fixa, ela se molda a um conjunto de variáveis que definem quem somos em nosso corpo e movimento. Idade, sexo, altura, peso, nível de atividade física e até as fases da vida, como gestação ou amamentação, alteram essa equação vital. Com o passar dos anos, o metabolismo tende a se tornar menos ativo. Por isso, as necessidades calóricas diminuem gradualmente à medida que envelhecemos. E há ainda o propósito pessoal: perder, manter ou ganhar peso. Cada meta redesenha o quanto devemos consumir. Alimentar-se,

afinal, é um ato de equilíbrio entre o que somos, o que fazemos e o que desejamos nos tornar. Porém, existem estimativas médias gerais, conforme elencado abaixo.

Estimativa das calorias necessárias por dia, de acordo com a idade e o sexo. Dos 12 aos 23 meses de idades:

IDADE EM MESES	Masculino	Feminino
12	800	800
15	900	800
18	1.000	900
21 até 23	1.000	1.000

Tabela 1: Necessidades calóricas na primeira fase da infância. Fonte: United States Department of Agriculture; United States Department of Health and Human Services, 2020.

Estimativa das calorias necessárias por dia, de acordo com a idade, sexo e nível de atividade física. Dos 2 anos de idade em diante:

IDADE	Masculino			Feminino		
	Sedentário	Atividade Moderada	Ativo	Sedentária	Atividade Moderada	Ativa
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.400	1.400	1.000	1.200	1.400
4	1.200	1.400	1.600	1.200	1.400	1.400
5	1.200	1.400	1.600	1.200	1.400	1.600
6	1.400	1.600	1.800	1.200	1.400	1.600
7	1.400	1.600	1.800	1.200	1.600	1.800
8	1.400	1.600	2.000	1.400	1.600	1.800
9	1.600	1.800	2.000	1.400	1.600	1.800
10	1.600	1.800	2.200	1.400	1.800	2.000
11	1.800	2.000	2.200	1.600	1.800	2.000
12	1.800	2.200	2.400	1.600	2.000	2.200

13	2.000	2.200	2.600	1.600	2.000	2.200
14	2.000	2.400	2.800	1.800	2.000	2.400
15	2.200	2.500	3.000	1.800	2.000	2.400
16	2.400	2.800	3.200	1.800	2.000	2.400
17	2.400	2.800	3.200	1.800	2.000	2.400
18	2.400	2.800	3.200	1.800	2.000	2.400
19-20	2.600	2.800	3.000	2.000	2.200	2.400
21-25	2.400	2.800	3.000	2.000	2.200	2.400
26-30	2.400	2.600	3.000	1.800	2.000	2.400
31-35	2.400	2.600	3.000	1.800	2.000	2.200
36-40	2.400	2.600	2.800	1.800	2.000	2.200
41-45	2.200	2.600	2.800	1.800	2.000	2.200
46-50	2.200	2.400	2.800	1.800	2.000	2.200
51-55	2.200	2.400	2.800	1.600	1.800	2.200
56-60	2.200	2.400	2.600	1.600	1.800	2.200
61-65	2.000	2.400	2.600	1.600	1.800	2.000
66-70	2.000	2.200	2.600	1.600	1.800	2.000
71-75	2.000	2.200	2.600	1.600	1.800	2.000
76 e acima	2.000	2.200	2.400	1.600	1.800	2.000

Tabela 2: Necessidades calóricas dos 2 anos de idade em diante. Fonte: United States Department of Agriculture; United States Department of Health and Human Services, 2020.

Sedentário significa um estilo de vida que inclui apenas as atividades físicas básicas necessárias à vida independente; Moderadamente ativo significa um estilo de vida que inclui atividade física equivalente a caminhar de aproximadamente 2,5 a 5 quilômetros por dia, a uma velocidade de 4,8 a 6,4 km/h, além das atividades cotidianas da vida independente; Ativo significa um estilo de vida que inclui atividade física equivalente a caminhar mais de 5 quilômetros por dia, a uma velocidade de 4,8 a 6,4 km/h, além das atividades cotidianas da vida independente.

E a forma como obtemos estes macronutrientes é de fato a questão central quando se trata da busca por alimentos ou sua produção controlada. E em relação ao aspecto de sermos onívoros, o consumo de outros animais sempre foi uma forma que os *Homo sapiens*

encontraram para prosperar e triunfar em qualquer ambiente geográfico e condição climática que se encontrassem. De todos os animais conhecidos no planeta, os humanos apenas não podem consumir o fígado do urso polar, porque possui muita vitamina A, o que causaria uma intoxicação e levaria a morte, o tubarão-dorminhoco do Pacífico (*Somniosus pacificus*) por sua toxicidade, e alguns peixes da família *Tetraodontidae*, como os baiacus (Kean, 2022), todos os demais animais do planeta são edíveis e podem ser consumidos pelos humanos.

O baiacu é famoso por seu sistema de defesa contra predadores, no qual ele engole água, fazendo com que seu corpo pareça maior. E também é conhecido por sua toxicidade, ele secreta uma toxina (tetrodotoxina) que é 1.200 vezes mais letal que o cianeto, sendo um dos animais mais venenosos do mundo. Embora o peixe tenha toxina suficiente para matar 30 pessoas, ele é considerado uma iguaria muito apreciada no Japão, onde o prato é conhecido como *Fugu*. As pessoas consomem o peixe venenoso por causa de sua capacidade de provocar uma sensação de euforia. Para que seja seguro para o consumo, o baiacu deve ser preparado por chefs altamente qualificados (Ogura, 1971).

Os primeiros hominídeos, que se separaram dos chimpanzés há aproximadamente seis milhões de anos, mantinham uma dieta de caráter onívoro, composta sobretudo por tecidos vegetais, tais como frutos, tubérculos, nozes e folhas, com acréscimos ocasionais de invertebrados, pequenos vertebrados e restos de caça deixados por grandes predadores, e até canibalismo (Nishie e Nakamura, 2018). A evolução das ferramentas, do lascamento de pedras às lanças e do arco e flecha, ampliou a capacidade de caça, permitindo o abate e o consumo de animais maiores. Com o tempo, essa transição alimentar conduziu a espécie humana de um nível moderado de consumo de carne, semelhante ao dos chimpanzés, a um estágio de robusta dieta carnívora, que atingiu seu auge no *Homo erectus* e começou a declinar no Paleolítico Superior. As mudanças anatômicas acompanharam esse processo: aumento das reservas de gordura, maior acidez estomacal, redução dos músculos da mastigação e do volume intestinal, indícios de uma dieta mais densa em energia e de uma adaptação a alimentos de origem animal (Ihde, 2017).

O nível de pH do estômago dos *Homo sapiens* é muito ácido, com uma média em jejum de cerca de (2,16) para homens e (2,79) para mulheres. Sendo que o estômago dos *Homo sapiens* é um dos que contêm o maior nível de acidez, ficando atrás apenas de aves como o urubu, uma espécie de ave cathartiformes da família *Cathartidae* (Gasparotto, 2011).

Com a extinção dos grandes herbívoros, como os mamutes, na transição para o Neolítico, fenômeno que se deu em parte devido às mudanças climáticas que proporcionaram a expansão das florestas onde antes eram áreas de pastoreio, os humanos diversificaram suas

estratégias alimentares, incluindo a pesca e a caça em diferentes ambientes. Ainda assim, os grupos caçadores-coletores permaneceram pequenos, variando de cerca de trinta a quinhentas pessoas, com densidades populacionais médias de apenas 0,25 indivíduo por quilômetro quadrado, valores comparáveis aos dos chimpanzés.

A energia disponível em cada ambiente impunha limites claros: nenhuma sociedade baseada apenas em caça e coleta poderia sustentar aglomerações humanas significativas. Mesmo as comunidades costeiras, favorecidas por fontes ricas como o salmão ou as focas, raramente ultrapassam poucas centenas de membros. Esses dados revelam que, desde suas origens, a humanidade esteve vinculada à escassez, o que indica que a densidade urbana contemporânea é um fenômeno radicalmente novo, antinatural, diante da história biológica da espécie (Smil, 2024).

Quanto à forma principal de adquirir alimento das primeiras sociedades humanas, o mais comum era a cultura do forrageamento. Sociedades compostas aproximadamente por 240 indivíduos, dominavam um território de cerca de 80 quilômetros quadrados, e neste espaço detinham o conhecimento sobre a época em que as plantas forneciam frutos ou grãos e quando era o período de migração dos animais pela área. Estima-se que o tempo demandado para um indivíduo caçador e coleto em suprir suas necessidades alimentares semanais era de no máximo 20 horas de labor por semana (Lanchester, 2017). Essa foi a forma majoritária como as sociedades humanas conseguiram suprir suas necessidades alimentares por mais de 285.000 anos.

De acordo com a perspectiva de James C. Scott (1936-2024) que foi um antropólogo e cientista político da Universidade de Yale, em seu livro *Against the Grain: A Deep History of the Earliest States* (Contra o Grão: Uma história profunda dos primeiros Estados), os humanos deixaram a cultura do forrageamento não por opção ou por terem descoberto como controlar o cultivo dos grãos - foram encontrados no atual território da Turquia estoques de pão armazenados que remontam há 45 mil anos antes do presente -, mas sim porque foram forçados devido a uma mudança climática que ocorreu entre 12 a 15 mil anos antes do presente e que comprometeu o estilo de vida baseado nos ciclos naturais, que se desregularam e não eram mais previsíveis e confiáveis. Logo, controlar a própria produção de alimentos foi uma necessidade e não uma opção (Scott, 2017).

Ainda de acordo com Scott, esta transição para a vida agrícola cobrou um preço muito alto. Ao domesticar animais e conviver junto a eles, alimentando-se de seu leite e dividindo prolongadamente o mesmo espaço, o surgimento de novas doenças foi favorecido pela transferência de microorganismos entre as espécies, o que acarreta em enfermidades e

epidemias que são comuns até os dias atuais. A média de estatura e também a expectativa de vida das pessoas foram encurtadas porque a fonte de alimentação que era diversa, com a adesão da agricultura, passou a ser mais limitada e restritiva.

Outra decorrência dos grãos foi uma vida de labor interminável. Cultivar os campos demandava preparar o solo, irrigá-lo, fertilizá-lo e depois proteger a colheita, até que estivesse madura e pronta para ser colhida, tanto de animais selvagens quanto de outros grupos de humanos, surge assim a ideia de propriedade privada. A noção de agricultura em si, com grandes extensões territoriais sendo cultivadas com apenas uma única espécie de planta, é em si também antinatural.

Paulatinamente, isso levou à divisão social do trabalho e posteriormente à divisão da sociedade em classes. Logo, surgiram os Estados e seus exércitos e com eles a instauração da servidão e da escravidão. O modelo agrário, contudo, passou a ser amplamente adotado, especialmente nas regiões do planeta em que os grãos eram autóctones, ou seja, no atual território da América Central; Oriente Médio e norte da África; Europa e sudoeste da Ásia. Nestas regiões surgiram os grandes impérios da antiguidade que desenvolveram os conjuntos tecnológicos demandados pela Revolução Agrícola - calendários, muitas vezes em forma de pirâmides; escrita para o senso e a contabilidade; atividade astronômica e meteorológica; formas de trocas comerciais e posteriormente moedas e a matemática, ou seja, as próprias bases que estão presentes nas sociedades organizadas até os dias atuais.

Desde que a Revolução do Neolítico ocorreu, há aproximadamente 12 mil anos antes do presente, os avanços na ciência da agricultura foram cadenciados lentamente, promovidos sobretudo por tecnologias desenvolvidas na China. O advento do arado por tração animal, a rotação de campos e a inserção de moinhos de água e vento, com alguns acréscimos da metalurgia que produziam ferramentas mais eficazes, foram as grandes novidades na área por milhares de anos.

As Navegações promoveram a dispersão de espécies de plantas e de animais de um continente a outro. A batata, nativa dos Andes, passou a ser um dos principais amidos consumidos na Europa, assim como o milho, a abóbora e o feijão que são originários da península do Yucatan e tornaram-se tradicionais na culinária de todos os continentes. Quem caminha pelo *campus* universitário e observa um grupo de araras banqueteando nas grandes mangueiras carregadas de frutos pode até imaginar que esta planta é tipicamente brasileira, mas ela foi trazida ao Brasil pelos portugueses no século XVII desde o sudoeste asiático.

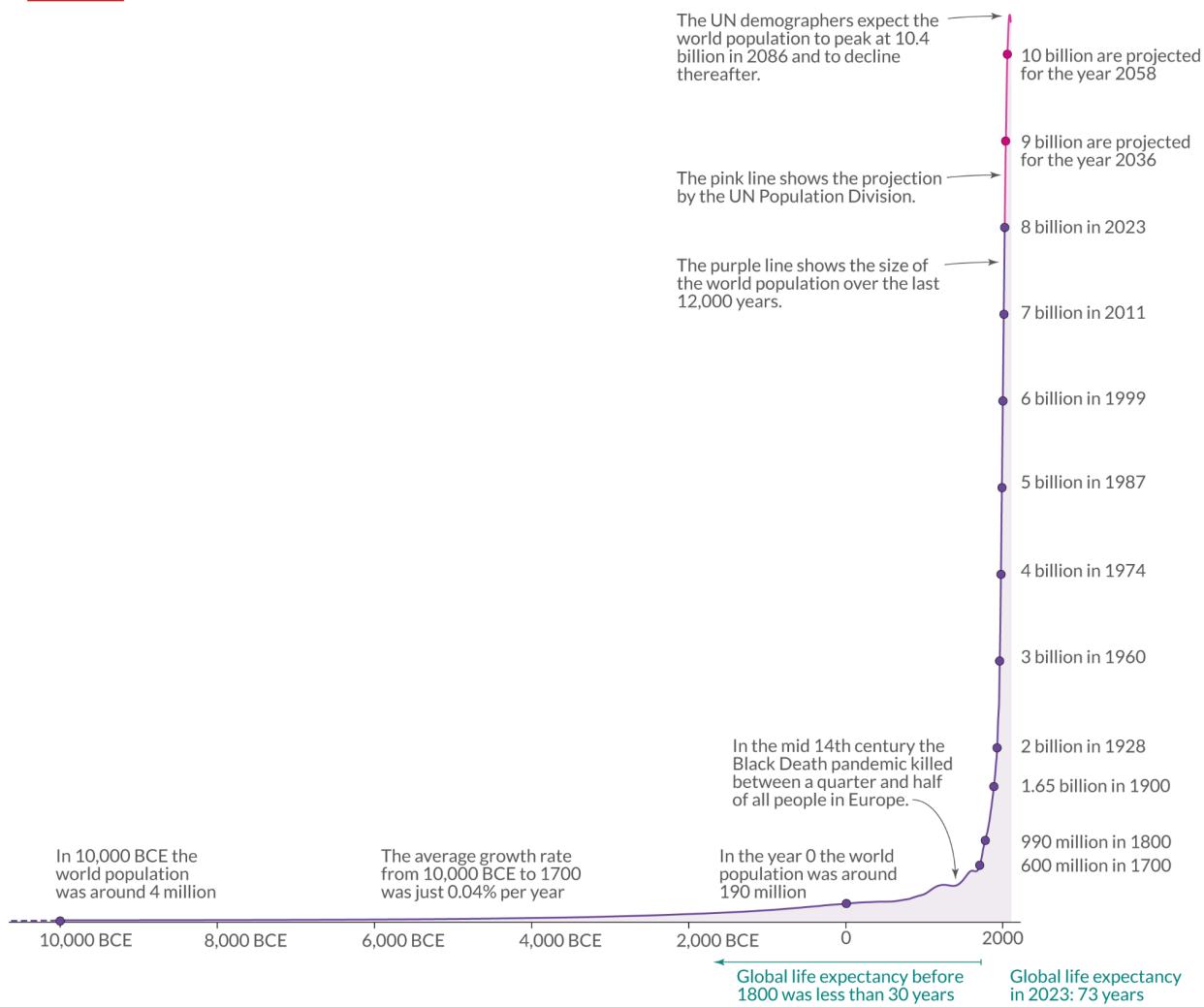
Nesta nova forma de organização social introduzida pela Revolução do Neolítico, os *Homo sapiens* passaram a ser agricultores e fazendeiros que controlavam o que produziam e,

logo, do que viriam a se alimentar. Mas as dietas eram em grande parte regionalizadas, as pessoas comiam os alimentos vegetais disponíveis de acordo com a estação do ano e seu ciclo local de produção e os animais que conseguiam criar e nutrir com base na sua disponibilidade de terras.

Era impensável, até mesmo para a monarquia europeia, num espaço de 150 anos atrás, ir a uma venda de alimentos, em pleno inverno, e encontrar uma variedade de frutas à disposição que variariam desde a banana cultivada na República Dominicana até um Kiwi, nativo e produzido na Nova Zelândia. Logo, a densidade populacional também mantinha-se estável proporcionalmente à capacidade produtiva das sociedades em que estavam inseridos.

O número de humanos no planeta se manteve com aproximadamente 600 milhões de pessoas desde o primeiro ano da era cristã até meados do século XVIII, com uma expectativa de vida média desde a Idade Média até o início dos anos 1800 de 30 anos de idade. No ano de 2023 essa expectativa de vida média global é de 73 anos, e a população do planeta para o mesmo ano era de 8.065 bilhões de pessoas. O que mudou radicalmente nestes últimos dois séculos que alterou tanto a densidade populacional e a expectativa de vida, positivamente por um lado, e piorou drasticamente as condições climáticas, por outro? A resposta é precisamente outra revolução pela qual os humanos passaram, a Revolução Industrial.

The size of the world population over the long-run



Based on estimates by the History Database of the Global Environment (HYDE) and the United Nations.

This is a visualization from OurWorldinData.org.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

Figura 2: Evolução da população humana mundial desde 10.000 a.C. até a projeção para o ano de 2058. Fonte: Roser e Ritchie, 2023.

4. O paradoxo da industrialização

A revolução agrícola demandou um nível de organização coletiva dos humanos que proporcionou o surgimento dos primeiros agrupamentos sociais que culminaram no estabelecimento de cidades e, posteriormente, dos primeiros impérios. Outra necessidade que

emergiu desta nova ordem humana foi uma fonte energética para ser utilizada nestes processos produtivos. E o elemento que foi fundamental para a produção agrícola em larga escala foi a domesticação de animais e dos próprios humanos.

A origem da palavra “doméstico” vem do latim Domus. O termo Domus, conforme apresentado no *Dictionary of Greek and Roman Antiquities* (Dicionário de Antiguidades Gregas e Romanas), de William Smith, designava a residência privada de um cidadão romano, especialmente daqueles pertencentes às classes mais abastadas. Mais do que uma simples casa, a Domus era uma instituição social e simbólica: o centro da vida familiar e da autoridade do *pater familias*. Nela se reuniam não apenas os membros da família, mas também clientes, servos e dependentes, refletindo a estrutura hierárquica e patriarcal da sociedade romana. O espaço físico da Domus, com seus átrios, peristilos e altares domésticos, expressava materialmente o poder e o status de seu proprietário, funcionando como microcosmo da ordem cívica e moral de Roma.

Entretanto, a Domus ultrapassava o sentido arquitetônico e social, assumindo também um valor moral e político. Era o lugar onde se perpetuavam o nome, os ritos e as virtudes da linhagem; onde se guardavam as imagens dos antepassados e se cultuava o Genius doméstico. Assim, a Domus simbolizava a continuidade da família e, por extensão, a estabilidade do Estado romano. Sua organização interna, disciplinada e hierárquica, servia de modelo para a organização da *res publica*. Dessa forma, o conceito de Domus condensava a essência da civilização romana: a fusão entre o espaço privado e a ordem pública, entre a intimidade da casa e a grandiosidade da cidade (Smith, 1849). A definição de domesticação, é, portanto, a essência fundadora da ideia de Estado que nos acompanha até os dias atuais.

Andrew Rimas e Evan Fraser, em seu livro *Beef: The Untold Story of How Milk, Meat, and Muscle Shaped the World* (Carne bovina: a história não contada de como o leite, a carne e os músculos moldaram o mundo), demonstram como a domesticação do gado moldou o curso da civilização humana, sendo tão decisiva quanto o domínio do fogo ou a invenção da agricultura. A história da pecuária começa com o auroque (*Bos primigenius*), o ancestral selvagem do boi doméstico, cuja domesticação representou não apenas uma conquista técnica, mas também simbólica: o controle sobre uma das forças mais poderosas do mundo natural. Esse processo proporcionou que as comunidades se tornassem assentamentos agrícolas estáveis, pois o gado fornecia carne, leite, couro, força de tração e esterco (que servia como fertilizante para as lavouras), e, assim, passou a figurar como o núcleo de um novo modelo de subsistência que permitiu o surgimento de vilas e posteriormente cidades e impérios.

A domesticação do gado também revolucionou a agricultura. Ao converter pastagens em alimento humano e fornecer energia animal para o arado, os bois ampliaram radicalmente a produtividade dos campos e, com isso, a capacidade das sociedades de sustentar populações crescentes. Esse excedente agrícola tornou possível o surgimento da divisão do trabalho, do comércio e da estratificação social. O gado se converteu em sinônimo de riqueza e poder, sendo usado como moeda, dote, tributo e símbolo religioso. Logo, economia e espiritualidade humanas se fundiram em torno desse animal que representava tanto a fertilidade da terra quanto a força da vida.

No plano cultural e simbólico, o gado ocupou o centro das mitologias e das religiões, do touro sagrado do Egito e do Minotauro cretense ao bezerro de ouro bíblico. O animal encarnava tanto a força bruta quanto o mistério da criação, sendo venerado e sacrificado em rituais que buscavam garantir a continuidade da fertilidade e da ordem social. Essa relação ambivalente, de adoração e domínio, reflete a própria condição humana diante da natureza: dependente dela, mas sempre tentando controlá-la. A domesticação do gado, portanto, foi também um ato de autodomesticação, no qual o *Homo sapiens* moldou o animal e, ao mesmo tempo, moldou a si mesmo.

Por fim, Rimas e Fraser destacam que a dieta humana foi profundamente alterada pela presença do gado. O consumo de leite e carne aumentou a disponibilidade de macronutrientes como proteínas e gorduras, impulsionando o crescimento populacional e até mudanças genéticas, como a adaptação à lactose em algumas populações. Ao longo do tempo, o gado passou de aliado natural a produto industrial, símbolo das contradições do progresso moderno: fartura e destruição ambiental, nutrição e desigualdade. Assim, a história da domesticação do gado é, em última instância, a história de como a humanidade transformou a natureza, e, nesse processo, transformou a si mesma (Rimas e Fraser, 2008).

Ainda de acordo com o já mencionado professor James C. Scott, a transição da caça e coleta para a agricultura de grãos não surgiu espontaneamente como um progresso, mas como um processo gradual e ambíguo, marcado por coerção e perda de autonomia. As sociedades agrícolas iniciais, dependentes de plantas domesticadas e de territórios delimitados, tornaram-se mais vulneráveis a hierarquias, epidemias e à exploração de sua força de trabalho. A domesticação de plantas e animais foi acompanhada pela domesticação do próprio ser humano, controlado pelo clima e tempo, pela colheita e pela necessidade de produzir excedentes.

Scott aponta que os primeiros Estados não nasceram apenas da organização espontânea da vida agrícola, mas da capacidade de extrair, controlar e tributar o trabalho

humano. A agricultura de cereais, por ser mensurável e armazenável, permitiu o surgimento de elites que monopolizavam o excedente e impunham sistemas de vigilância e coerção. O trabalho humano, antes livre e móvel, foi fixado ao solo por meio de muros, irrigação e burocracias que monitoravam cada grão produzido. A escravidão e o trabalho forçado não foram desvios, mas pilares estruturais dessa nova ordem: a agricultura de Estado dependia da submissão e da imobilidade das populações para garantir a estabilidade da produção e da tributação.

A partir desta análise, ele argumenta que a Revolução do Neolítico deve ser vista menos como um triunfo civilizacional e mais como o início de uma era de servidão e escravidão institucionalizadas. A domesticação de humanos, através da imposição do trabalho agrícola, da guerra e da hierarquia, se deu paralelamente à domesticação das plantas e dos animais. Assim, a força humana de trabalho foi o verdadeiro motor da civilização, mas também sua primeira vítima: o corpo que antes caçava e vagava livre passou a ser controlado, contabilizado e punido. A civilização, nesse sentido, nasceu não da liberdade criativa da humanidade, mas da disciplina imposta pelos campos de grãos, pelos reis e seus exércitos e pelas muralhas que os cercavam (Scott, 2017).

Por todos os séculos em que este modelo de produção agrícola foi o sistema vigorante nas sociedades humanas, a matriz energética subsume-se, portanto, à força humana, tração animal, lenha (carvão mineral em alguns casos em que estava disponível), energia hídrica e eólica, ou seja, basicamente recursos renováveis e orgânicos e com uma capacidade poluente (gases de efeitos estufa) muito reduzida. E essa dependência de energias orgânicas limitava a produção econômica, pois a quantidade de energia disponível estava diretamente ligada à terra cultivável e à biomassa. Este aspecto explica o fato da densidade populacional ter se mantido quase estável por dois milênios, conforme exposto acima na Figura 2.

Assim, as economias pré-industriais eram restritas pelo solo: só podiam crescer até onde o suprimento natural de energia permitisse. Na Inglaterra, depois do fenômeno das Navegações, no entanto, a crescente demanda por calor para aquecimento das moradias que se expandiram em quantidade e metal, somada ao esgotamento das florestas, levou à busca por fontes alternativas, e o carvão mineral emergiu como a solução.

A transição energética que resultaria na Revolução Industrial ocorreu entre os séculos XVII e XIX, tendo como epicentro a Inglaterra, que viria a se tornar o *Império onde o Sol nunca se põe*, e em que as reservas abundantes de carvão, aliadas à inovação técnica e à expansão do comércio, criaram as condições ideais para uma mudança de paradigma. Foi Thomas Newcomen (1644-1729) quem desenvolveu o primeiro sistema de máquina à vapor

por volta de 1712. Seu propósito era desenvolver um dispositivo que fosse capaz de criar um sistema de drenagem que possibilitasse a continuidade das atividades nas minas de carvão, cada vez mais profundas e mais alagadas, próximas aos grandes centros comerciais do país.

O carvão, uma forma de energia inorgânica e virtualmente ilimitada, rompeu o vínculo entre crescimento econômico e recursos biológicos. A invenção da máquina a vapor, capaz de converter o carvão em força motriz, foi o ponto decisivo dessa transformação: ampliou a produtividade, acelerou o transporte e possibilitou a mecanização da indústria têxtil e metalúrgica. O resultado foi um salto sem precedentes na capacidade produtiva e na urbanização.

Wrigley argumenta que essa mudança teve efeitos estruturais profundos: ao substituir uma economia orgânica por uma economia fóssil, a Revolução Industrial libertou a humanidade das restrições energéticas da terra, mas inaugurou uma nova dependência, a do carbono. O carvão não apenas sustentou o crescimento econômico e populacional, como também alterou radicalmente as relações sociais e ambientais. A energia fóssil tornou-se o motor do capitalismo industrial, concentrando riqueza e poder em torno das nações que dominavam essa fonte. Assim, a transição energética foi simultaneamente um processo técnico, econômico e civilizacional: o início da era em que o domínio da energia significou o domínio do mundo. (Wringley, 2010).

Mas não foi Thomas Newcomen quem direcionou a força da energia do vapor para o emprego diretamente na planta industrial, isso foi obra do escocês James Watt (1736-1829). A originalidade de James Watt consistiu em transformar uma invenção rudimentar, a máquina de Newcomen, em um sistema eficiente e revolucionário. Como descrito, a máquina de Newcomen era usada apenas para bombear água de minas, e neste processo desperdiçava grande parte da energia do vapor, pois resfriava e aquecia o cilindro a cada ciclo. Watt, ao observar esse problema, concebeu uma solução fundamental: o condensador separado, que permitia que o cilindro principal permanecesse quente enquanto a condensação ocorria em outro compartimento. Essa inovação reduziu drasticamente o consumo de combustível e multiplicou a eficiência energética da máquina.

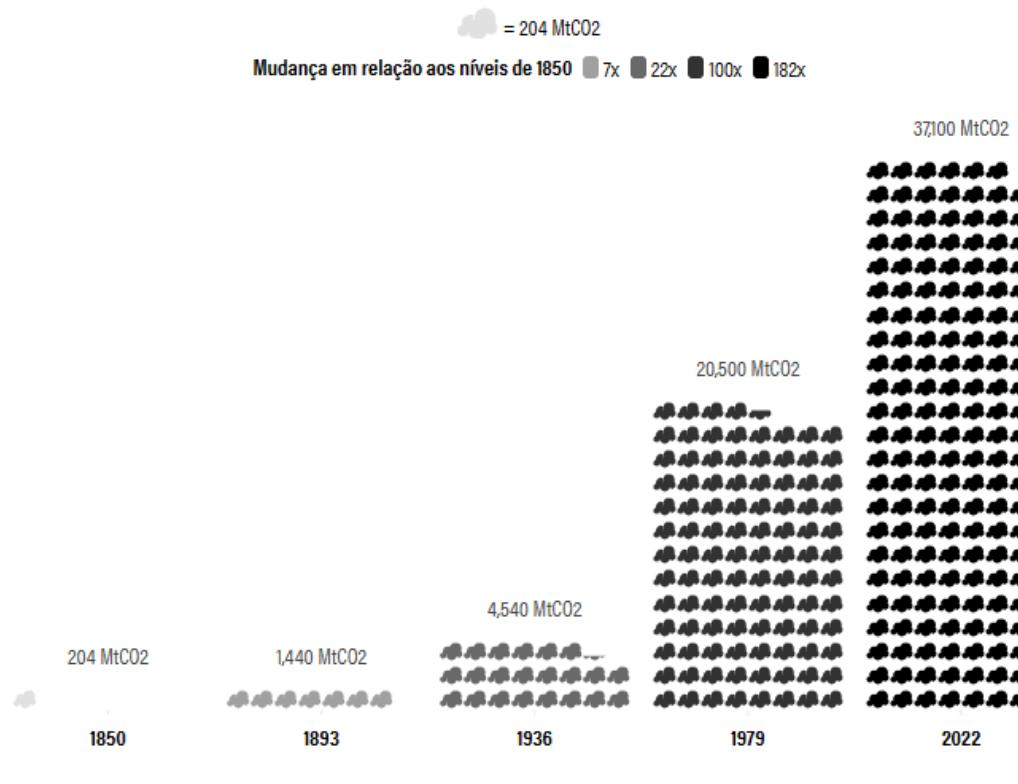
O impacto da melhoria de Watt foi imenso. Sua máquina não apenas aprimorou o bombeamento em minas de carvão e metal, mas também se tornou aplicável em fábricas, moinhos e, posteriormente, no transporte. Ao integrar conceitos de física experimental e princípios de termodinâmica ainda incipientes, Watt transformou uma curiosidade mecânica em uma força motriz universal, adaptável a diferentes usos industriais. Sua parceria com o empresário Matthew Boulton (1728-1809) foi decisiva: juntos, fundaram uma empresa capaz de

produzir e comercializar máquinas padronizadas, introduzindo um novo modelo de negócio baseado na inovação tecnológica e no licenciamento de patentes.

Assim, Watt não apenas aperfeiçoou uma invenção, mas acabou por redefinir o conceito de energia na era moderna (quando falamos da energia que a Terra recebe do Sol utilizamos a medida W - watt, que é empregada em sua homenagem). Sua máquina marcou a passagem de uma economia dependente da força humana, animal e hidráulica para uma economia movida pelo vapor, abrindo caminho para a Revolução Industrial. O vapor tornou-se o símbolo do domínio humano sobre a natureza, multiplicando a capacidade produtiva e transformando a paisagem urbana e social da Europa. Como observa David P. Miller, Watt não inventou a Revolução Industrial, mas forneceu-lhe o motor, literal e metafórico, que a impulsionaria por mais de um século. (Miller, 2019).

Esta revolução traria consigo consequências ambientais que comprometeram o orçamento térmico do planeta. Com mais CO₂ na atmosfera, as ondas longas que dissipam calor da superfície terrestre para o espaço acabam ficando confinadas na atmosfera da Terra, causando impactos irreversíveis para o equilíbrio climático do planeta, que é fundamental para o próprio equilíbrio e manutenção de toda a vida, inclusive a dos *Homo sapiens*. “As emissões de dióxido de carbono (CO₂) originadas por atividades humanas são mais altas hoje do que em qualquer outro período da história. Dados recentes mostram que as emissões globais de CO₂ em 2022 estavam 182 vezes acima do que em 1850, enquanto a Revolução Industrial acontecia”. (WRI Brasil, 2025).

Emissões Globais de Dióxido de Carbono de 1850 a 2022



Fonte: [Climate Watch - PIK](#) • Emissões de CO₂

 WORLD RESOURCES INSTITUTE

Figura 3: Emissões globais de Dióxido de Carbono desde a Revolução Industrial. Fonte: WRI Brasil, 2025.

E o país que foi o berço da Revolução Industrial encerrou apenas recentemente o uso de carvão como fonte de energia. A Inglaterra acabou com a operação de sua última usina elétrica a carvão, em Ratcliffe-on-Soar (Nottingham), em 30 de setembro de 2024, encerrando assim 142 anos de uso contínuo desse combustível fóssil. Essa medida marca um momento simbólico nas políticas britânicas de mitigação climática, pois o carvão é responsável por elevadas emissões de gases de efeito estufa (IPEA, 2025).

Para além deste desequilíbrio ambiental causado pelo aumento de um gás que amplia e desregula o efeito estufa e assim todo o clima no planeta - lembrando que a Revolução Industrial e os países industrializados que se beneficiaram diretamente dela possuem uma localização geográfica bem restrita e definida, mas o clima não pode ser contido e no caso de algum desequilíbrio suas consequências se estendem por toda a superfície do

planeta -, a Revolução Industrial ocasionou outras consequências que alterariam a relação dos *Homo sapiens* com a produção de alimentação e com o próprio propósito e essência de toda nutrição.

A Revolução Industrial, que tinha o carvão como matriz energética, iria revolucionar os modos de produção, a disposição da vida social em cidades que agora se organizavam em torno de fábricas e os meios de transporte. Ela possibilitou que novos avanços técnicos acontecessem, como o surgimento da energia elétrica, que se tornaria a força matriz energética daquilo que se caracterizaria como sendo a segunda fase da Revolução Industrial. Associada ao avanço da química sintética, que foi um dos principais setores de desenvolvimento tecnocientífico no século XX, a segunda fase da Revolução Industrial também promoveria uma segunda forma de Revolução Agrícola.

Esta segunda Revolução Agrícola nasceu do avanço científico e tecnológico que sucedeu à Revolução Científica e à Revolução Industrial. A invenção do processo Haber-Bosch, no início do século XX, permitiu a fixação artificial do nitrogênio atmosférico para a produção de amônia, base dos fertilizantes sintéticos. Essa conquista foi possível graças à aplicação dos princípios da química, da física e da engenharia industrial, mostrando como a ciência teórica e a tecnologia prática se fundiram para alterar radicalmente a relação entre a humanidade e a natureza.

Vaclav Smil, em seu livro *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production* (Enriquecendo a Terra: Fritz Haber, Carl Bosch e a transformação da produção mundial de alimentos), destaca que essa revolução foi impulsionada pela energia elétrica e pelos combustíveis fósseis, os quais viabilizaram a síntese em larga escala e o funcionamento contínuo das indústrias químicas que tiveram seu começo nas plantas da empresa BASF. A conversão de energia elétrica e térmica em energia química fez do processo Haber-Bosch um dos pilares da modernidade. A agricultura deixou de depender apenas dos ciclos naturais de fertilização e passou a ser sustentada por uma fonte controlável de nutrientes, rompendo os limites ecológicos que antes restringiam a produção de alimentos. Assim, a energia, agora transformada e armazenada na forma de compostos nitrogenados, tornou-se o elo entre a ciência, a indústria e a biologia.

Tal transformação promovida por Fritz Haber (1868-1934) e Carl Bosch (1874-1940) foi tanto produtiva quanto demográfica: ao multiplicar a oferta de alimentos, permitiu o crescimento populacional global e sustentou a urbanização e a industrialização do século XX. No entanto, Smil ressalta que esse “triunfo da ciência” veio acompanhado de dilemas éticos e ambientais. O mesmo processo que salvou bilhões de vidas da fome também criou uma

dependência massiva de fertilizantes, combustíveis fósseis e monoculturas, alterando os ciclos biogeoquímicos do planeta e contribuindo para desequilíbrios ecológicos e emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, Smil interpreta essa revolução como a expressão mais acabada da era energética moderna, na qual a humanidade aprendeu a dominar os fluxos de energia, desde o átomo até ao alimento. Se a Revolução Industrial libertou os *Homo sapiens* da limitação da força muscular e da madeira, a revolução química e elétrica de Haber e Bosch libertou-os das restrições naturais do solo. Essa continuidade entre ciência, energia e agricultura representa, segundo Smil, a essência da modernidade: a capacidade humana de transformar o próprio planeta em uma extensão de seu engenho técnico, mas também acarreta na responsabilidade de lidar com as consequências desse poder (Smil, 2001).

Ao mesmo tempo que possibilitou essa segurança alimentar, que elevou a população do planeta em 8 bilhões de habitantes no espaço reduzido de um século, tal processo possibilitou que uma maior área de solo pudesse ser cultivada, promovendo o desmatamento de florestas inteiras, o que aumenta ainda mais a pressão ambiental e o equilíbrio térmico da Terra.

E ainda, este processo Haber-Bosch, que gerou a produção de fertilizante sintético a partir do nitrogênio que naturalmente se encontra na atmosfera, tornou-se uma das principais causas das chamadas zonas mortas nos ecossistemas aquáticos. O nitrogênio sintético, ao ser aplicado em larga escala nas lavouras, raramente é totalmente absorvido pelas plantas, parte significativa é levada pela chuva e pela irrigação até rios e mares, enriquecendo a água com nutrientes em excesso. Esse fenômeno, conhecido como eutrofização, estimula a proliferação de algas e microrganismos que, ao se decomponem, consomem o oxigênio dissolvido e criam regiões hipóxicas, onde a vida aquática colapsa (National Geographic Society, 2023). Assim, a mesma tecnologia que libertou a agricultura dos limites naturais do solo impôs um novo tipo de dependência ecológica: o envenenamento silencioso das águas, símbolo paradoxal do poder e dos custos ambientais da era Haber-Bosch.

A Revolução Industrial revestida e incorporada na forma de uma nova Revolução Agrícola ainda é paradoxal no sentido de que as safras batem recorde de produção ano-após-ano, contudo, os insumos e sementes são monopólio de poucas corporações que controlam o acesso e a distribuição dos mesmos, sem serem responsabilizadas pelas consequências e danos ambientais causados por sua atividade. Há ainda o aspecto da dependência da aplicação em larga escala de agrotóxicos, que são maléficos para o meio-ambiente como um todo. Em menos de 200 anos de industrialização, os *Homo sapiens*

colocaram o equilíbrio climático do planeta à prova, e resta saber se tais limites planetários já não foram ultrapassados a um ponto de não-retorno que pode inevitavelmente levar todos os humanos à extinção.

5. Considerações finais

A trajetória evolutiva da Terra, desde sua formação até a era industrial, revela um contínuo processo de reorganização energética que culmina na emergência de uma espécie capaz de intervir conscientemente sobre as forças planetárias. O *Homo sapiens*, produto do tempo e da seleção natural, transformou-se em agente geológico ao expandir sua ação para além dos limites biológicos. Essa transformação, embora tenha proporcionado avanços materiais, científicos e tecnológicos sem precedentes, trouxe consigo um paradoxo fundamental: quanto maior o domínio humano sobre a natureza, maior a dependência da natureza em relação à ação humana para manter-se habitável.

Ao longo de milhões de anos, a biosfera desenvolveu mecanismos autorreguladores que asseguraram o equilíbrio termodinâmico do planeta. Com a Revolução Industrial e o advento da tecnosfera, esse equilíbrio foi substituído por sistemas artificiais de controle e extração que operam de modo descolado dos ciclos naturais. A industrialização do carbono, a intensificação da agricultura química e a urbanização em escala global alteraram os fluxos biogeoquímicos e inauguraram uma era de instabilidade ecológica. O planeta, antes um sistema autossustentado, tornou-se dependente das decisões e dos erros de uma única espécie.

A passagem da biosfera à tecnosfera pode ser interpretada, portanto, como a história de uma emancipação ambígua: o ser humano libertou-se das restrições naturais ao custo de fragilizar os próprios fundamentos de sua existência. O domínio da energia e da técnica transformou a Terra em extensão de seu projeto civilizatório, mas esse mesmo projeto agora ameaça os processos que o tornaram possível. A crise climática, a perda de biodiversidade e o colapso dos limites planetários não são acidentes históricos, mas expressões termodinâmicas de um modo de organização social e produtiva que rompeu a continuidade entre a vida e a energia.

Reconhecer essa continuidade é o primeiro passo para repensar a condição humana sob uma perspectiva não antropocêntrica. A espécie que emergiu da biosfera precisa reorientar-se como parte dela, e não como sua exceção. A filosofia e a ciência convergem,

nesse ponto, para uma mesma exigência ética: compreender que a sobrevivência não depende da expansão ilimitada da tecnosfera, mas da restauração das relações metabólicas entre humanidade e planeta.

O futuro da civilização dependerá, portanto, da capacidade coletiva de reconfigurar o metabolismo energético da Terra, substituindo a lógica da acumulação pela da regeneração, e o domínio pela coevolução. Somente assim será possível transformar a crise civilizatória em uma nova etapa de equilíbrio dinâmico entre cultura e natureza. Em última instância, o desafio que se impõe à espécie humana é o de tornar-se novamente parte da biosfera, agora de modo consciente, reflexivo e responsável.

Referências

AIYER, Kartik. The Great Oxidation Event: How Cyanobacteria Changed Life. *American Society for Microbiology*, 18 fev. 2022. Disponível em: [The Great Oxidation Event: How Cyanobacteria Changed Life](#) Acesso em: 09/set/2025.

CALLAWAY, E. Oldest Homo sapiens fossil claim rewrites our species' history. *Nature* (2017). [Oldest Homo sapiens fossil claim rewrites our species' history | Nature](#)

GASPAROTTO, Odival Cezar, et. al. *Fisiologia Animal Comparada*. Florianópolis: Biologia/Ead/UFSC, 2011.

HARARI, Yuval Noah. *Sapiens: nova edição - Uma breve história da humanidade*. Tradução de Jorio Dauster. São Paulo: Companhia das Letras, 2020.

IHDE, Don. *Tecnologia e o mundo da vida: do jardim à terra*. Tradução de Maurício Fernando Bozatski. Chapecó, SC: Editora Universidade Federal da Fronteira Sul, 2017.

IPEA. *Reino Unido fecha última usina de carvão após 140 anos*. Disponível em: [Reino Unido fecha última usina de carvão após 140 anos - Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade](#) Acesso em: 19/set/2025.

KATZ, David L. Plant-Based Diets for Reversing Disease and Saving the Planet: Past, Present, and Future. *Advances in Nutrition*, v. 10, supl. 4, p. S304–S307, 2019. Disponível em: [Plant-Based Diets for Reversing Disease and Saving the Planet: Past, Present, and Future - ScienceDirect](#). Acesso em: 17/set/2025.

KEAN, Sam. Death by Nutrition. *Science History Institute*, 22 nov. 2022. Disponível em: [Death by Nutrition | Science History Institute](#) Acesso em: 17/set/2025.

LAMBERT, Rhiannon. *The Science of Nutrition: Debunk the Diet Myths and Learn How to Eat Responsibly for Health and Happiness*. London: DK, 2022.

LANCHESTER, John. The case against civilization. *The New Yorker*, 18 set. 2017. Disponível em: [The Case Against Civilization](#) Acesso em: 17/set/2025.

LUCAS, Spencer G.; LUO, Zhe-Xi. Adelobasileus from the Upper Triassic of West Texas: The oldest mammal. *Journal of Vertebrate Paleontology*, v. 13, n. 3, p. 309-334, set. 1993.

MILLER, David Philip. *The Life and Legend of James Watt: Collaboration, Natural Philosophy, and the Improvement of the Steam Engine*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2019.

NASA. *The Balance of Power in the Earth–Sun System*. NASA, 2005. Disponível em: [The Balance of Power in the Earth-Sun System](#) Acesso em: 11/set/2025.

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY. Dead Zone. In: *National Geographic Education*. Última atualização em 19 out. 2023. Disponível em: [Dead Zone](#) Acesso em: 19/set/2025.

NATURAL HISTORY MUSEUM. *Human evolution*. Disponível em: [Human evolution | Natural History Museum](#) Acesso em: 17/set/2025.

NISHIE, Hitonaru; NAKAMURA, Michio. A newborn infant chimpanzee snatched and cannibalized immediately after birth: Implications for “maternity leave” in wild chimpanzee. *American Journal of Physical Anthropology*, v. 165, n. 1, p. 194-199, 2018. Disponível em: [A newborn infant chimpanzee snatched and cannibalized immediately after birth: Implications for “maternity leave” in wild chimpanzee - Nishie - 2018 - American Journal of Physical Anthropology - Wiley Online Library](#) Acesso em: 19/set/2025.

OGURA, Yasumi. Fugu (Puffer-Fish) Poisoning and the Pharmacology of Crystalline Tetrodotoxin in Poisoning. In: SIMPSON, Lance L. (ed.). *Neuropoisons*. Boston, MA: Springer, 1971. p. 139-158.

OSTERLOFF, Emily. *How an asteroid ended the age of the dinosaurs*. Natural History Museum, 2021. Disponível em: [How an asteroid ended the age of the dinosaurs | Natural History Museum](#) Acesso em: 17/set/2025.

ROCKSTRÖM, Johan; GAFFNEY, Owen. *Breaking Boundaries: The Science Behind Our Planet*. Londres: Dorling Kindersley, 2021.

ROSER, Max; RITCHIE, Hannah. How has world population growth changed over time? *Our World in Data*, 2023. Disponível em: [How has world population growth changed over time?](#) Acesso em: 18/set/2025.

SCOTT, James C. *Against the grain. A deep history of the early states*. New Haven: Yale University Press, 2017.

SMIL, Vaclav. *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.

SMIL, Vaclav. *How to feed the world. The history and future of food.* New York: Viking, An imprint of Penguin Random House LLC, 2024.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE; UNITED STATES DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Dietary Guidelines for Americans, 2020-2025. 9. ed. December 2020. Disponível em: [Dietary Guidelines for Americans, 2020-2025](#) Acesso em: 19/set/2025.

USP - Universidade de São Paulo. Temperatura global aumenta 1,6 °C e segue subindo; é como tentar parar um caminhão em alta velocidade. *Jornal USP*, s.d. Disponível em: [Temperatura global aumenta](#). Acesso em: 11/set/2025.

WRANGHAM, Richard W. *Catching Fire: How Cooking Made Us Human.* New York: Basic Books, 2009.

WARREN, Sasha. *How the Earth and moon formed, explained.* University of Chicago News, [s.l.], 2024. Disponível em: [How the Earth and moon formed, explained | University of Chicago News](#) Acesso em: 09/set/2025.

WRI BRASIL. Os países que mais emitiram gases de efeito estufa. Disponível em: [Os países que mais emitiram gases de efeito estufa | WRI Brasil](#). Acesso em: 19/set/2025.

YOO, D. et al. Complete sequencing of ape genomes. *Nature*, v. 641, p. 401-418, 9 abr. 2025. Disponível em: [Complete sequencing of ape genomes | Nature](#) Acesso em: 22/set/2025.