



Deforestación y Sostenibilidad de la Población Mundial: un Análisis Cuantitativo

Mauro Bologna y Gerardo Aquino

Sinopsis

En este trabajo se ofrece un análisis cuantitativo de la sostenibilidad del actual crecimiento de la población mundial en relación con el proceso paralelo de deforestación adoptando un punto de vista estadístico. Consideramos un modelo simplificado basado en un proceso de crecimiento estocástico impulsado por un recorrido aleatorio en tiempo continuo, que representa la evolución tecnológica de la humanidad, junto con un modelo logístico generalizado determinista para la interacción entre el hombre y el bosque, y evaluamos la probabilidad de evitar la autodestrucción de nuestra civilización. Basándonos en las tasas actuales de consumo de recursos y en la mejor estimación de la tasa de crecimiento tecnológico, nuestro estudio muestra que tenemos muy pocas probabilidades, menos del 10% en la estimación más optimista, de sobrevivir sin enfrentarnos a un colapso catastrófico.

Introducción

En las últimas décadas, el debate sobre el cambio climático ha adquirido una importancia global con consecuencias en las políticas nacionales y mundiales. Muchos factores debidos a la actividad humana se consideran como posibles responsables de los cambios observados: entre ellos, la contaminación del agua y del aire (sobre todo el efecto invernadero) y la deforestación son los más citados. Aunque el grado de contribución humana al efecto invernadero y a los cambios de temperatura sigue siendo objeto de debate, la deforestación es un hecho innegable. En efecto, antes del desarrollo de las civilizaciones humanas, nuestro planeta estaba cubierto por 60 millones de kilómetros cuadrados de bosques.¹ Como resultado de la deforestación, actualmente quedan menos de 40 millones de kilómetros cuadrados.² En este documento, nos centramos en las consecuencias de la deforestación indiscriminada.



Foto de [Karsten Winegeart](#) en [Unsplash](#)

Los servicios que los árboles prestan a nuestro planeta van desde el almacenamiento de carbono y la producción de oxígeno hasta la conservación del suelo y la regulación del ciclo del agua. Apoyan los sistemas alimentarios naturales y humanos y proporcionan hogar a innumerables especies, incluidos nosotros, a través de los materiales de construcción. Los árboles y los bosques son nuestros mejores limpiadores de la atmósfera y, debido al papel clave que desempeñan en el ecosistema terrestre, es muy poco probable imaginar la supervivencia de muchas especies, incluida la nuestra, en la Tierra sin ellos. En este sentido, el debate sobre el cambio climático quedará casi obsoleto en caso de una deforestación global del planeta. Partiendo de esta observación casi obvia, investigamos el problema de la supervivencia de la humanidad desde un punto de vista estadístico. Modelamos la interacción entre los bosques y los seres humanos basándonos en una dinámica determinista de tipo logístico, mientras que asumimos un modelo estocástico para el desarrollo tecnológico de la civilización humana. El primer modelo ya se ha aplicado en contextos similares,^{3,4} mientras que el segundo se basa en datos y en un modelo de consumo energético global,^{5,6} utilizado como indicador del desarrollo tecnológico de una sociedad. Esto da solidez a nuestra discusión y mostramos que, manteniendo el ritmo actual de deforestación, estadísticamente la probabilidad de sobrevivir sin enfrentarse a un colapso catastrófico, es muy baja. Relacionamos dicha probabilidad de sobrevivir con la capacidad de la humanidad para extenderse y explotar los recursos de todo el sistema solar. Según la escala de Kardashev,^{7,8} que mide el nivel de avance tecnológico de una civilización en función de la cantidad de energía que es capaz de utilizar, para poder extendernos por el sistema solar tenemos que ser capaces de aprovechar la energía irradiada por el Sol a un ritmo de $\approx 4 \times 10^{26}$ vatios. Nuestra tasa de consumo de energía actual se estima en $\approx 10^{13}$ vatios.⁹ Como se muestra en los subapartados "Modelo estadístico de desarrollo tecnológico" y "Resultados numéricos" de la siguiente sección, un resultado exitoso tiene un umbral bien definido y concluimos que la probabilidad de evitar un colapso catastrófico es muy baja, menos del 10% en la estimación más optimista.

Resultados del Modelo

Deforestación

La deforestación del planeta es un hecho[2]. Entre 2000 y 2012 se talaron 2,3 millones de Km² de bosques en todo el mundo,¹⁰ lo que equivale a 2×10^5 Km² al año. A este ritmo, todos los bosques desaparecerían aproximadamente en 100-200 años. Evidentemente, no es realista imaginar que la sociedad humana sólo empezará a verse afectada por la deforestación cuando se tala el último árbol. La progresiva degradación del medio ambiente debida a la deforestación afectaría gravemente a la sociedad humana y, en consecuencia, el colapso humano comenzaría mucho antes.

Curiosamente, la situación actual de nuestro planeta tiene mucho en común con la deforestación de la Isla de Pascua descrita en.³ Por lo tanto, utilizamos el modelo introducido en esa referencia para describir a grandes rasgos la interacción entre los humanos y los bosques. Ciertamente, no pretendemos aquí un modelo exacto y exhaustivo. Probablemente sea imposible construir un modelo de este tipo. Lo que proponemos e ilustramos en los siguientes apartados es un modelo simplificado que, no obstante, nos permite extrapolar las escalas temporales de los procesos implicados: es decir, el proceso determinista que describe la población humana y el consumo de recursos (forestales) y el proceso estocástico que define el crecimiento económico y tecnológico de las sociedades. Adoptando el modelo de³ (véase también¹¹) tenemos para la dinámica hombre-bosque

$$\frac{d}{dt} N(t) = rN(t) \left[1 - \frac{N(t)}{\beta R(t)} \right], \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} R(t) = r'R(t) \left[1 - \frac{R(t)}{R_c} \right] - a_0 N(t)R(t). \quad (2)$$

donde N representa la población mundial y R la superficie terrestre cubierta por bosques. β es una constante positiva relacionada con la capacidad de carga del planeta para la población humana, r es la tasa de crecimiento de los seres humanos (estimada como $r \sim 0,01 \text{ años}^{-1}$),¹² a_0 puede identificarse como el parámetro tecnológico que mide la tasa a la que los seres humanos pueden extraer los recursos del medio ambiente, como consecuencia de su nivel tecnológico alcanzado. r' es el parámetro de renovabilidad que representa la capacidad de regeneración de los recursos, (estimada como $r' \sim 0,001 \text{ años}^{-1}$), Rc ¹³ la capacidad de carga de los recursos que en nuestro caso puede identificarse con los 60 millones de kilómetros cuadrados de bosque iniciales. Una mirada más atenta a este modelo simplificado y a la analogía con la Isla de Pascua en la que se basa, muestra no obstante, fuertes similitudes con nuestra situación actual. Al igual que los antiguos habitantes de la Isla de Pascua, nosotros también, al menos durante unas décadas más, no podríamos abandonar el planeta. El consumo de los recursos naturales, en particular de los bosques, compite con nuestro nivel tecnológico. Un mayor nivel tecnológico conlleva un aumento de la población y un mayor consumo de bosques (mayor a_0), pero también un uso más eficaz de los recursos. Con un mayor nivel tecnológico podemos, en principio, desarrollar soluciones técnicas para evitar/prevenir el colapso ecológico de nuestro planeta o, como última oportunidad, para reconstruir una civilización en el espacio extraterrestre (véase la sección sobre la paradoja de Fermi). La dinámica de nuestro modelo de interacción entre humanos y bosques en las ecuaciones (1, 2), se caracteriza típicamente por una población humana creciente hasta que se alcanza un máximo tras el cual se produce un rápido y desastroso colapso de la población antes de alcanzar finalmente un estado estacionario de baja población o la extinción total. Utilizaremos este máximo como referencia para alcanzar un estado desastroso. Llamamos a este punto en el tiempo el "punto de no retorno" porque si la tasa de deforestación no se modifica antes de este momento la población humana no podrá sostenerse y se producirá un colapso desastroso o incluso la extinción. Como primera aproximación³, dado que la capacidad de regeneración de los recursos, r' , es un orden de magnitud menor que la tasa de crecimiento de los humanos, r , podemos despreciar el primer término del lado derecho de la ecuación (2). Por lo tanto, trabajando en un régimen de explotación de los recursos regido esencialmente por la deforestación, a partir de la Ec. (2) podemos derivar la tasa de extinción de los árboles como

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \approx -a_0 N. \quad (3)$$

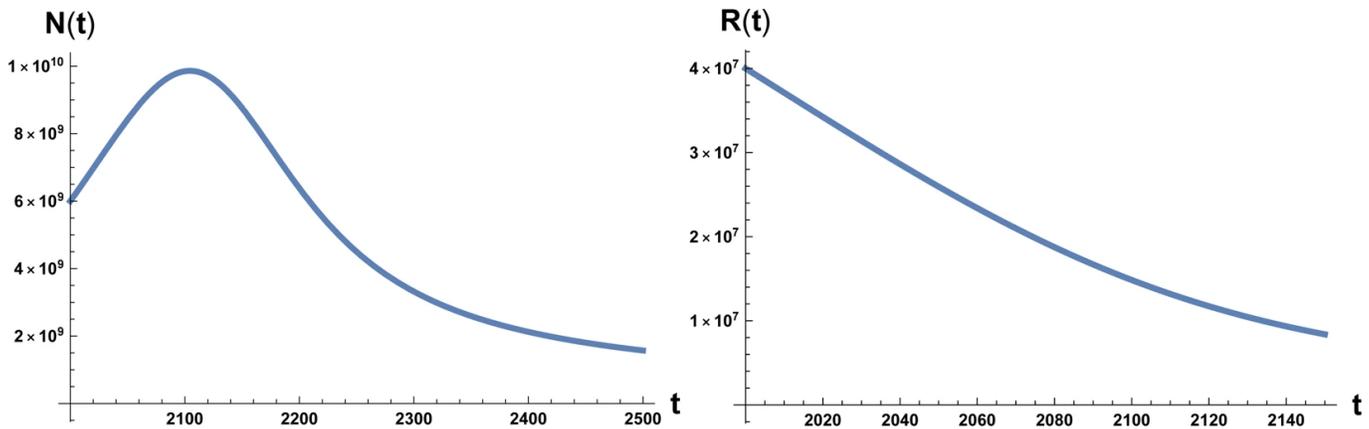
La población real de la Tierra es $N \sim 7,5 \times 10^9$ habitantes con una capacidad de carga máxima estimada¹⁴ de $Nc \sim 10^{10}$ habitantes. La capacidad de carga de los bosques puede tomarse como $1 Rc \sim 6 \times 10^7 \text{ Km}^2$ mientras que la superficie real de los bosques es $R \approx 4 \times 10^7 \text{ Km}^2$. Suponiendo que β es constante, podemos estimar este parámetro evaluando la igualdad $Nc(t) = \beta R(t)$ en el momento en que los bosques estaban intactos. Aquí $Nc(t)$ es la capacidad de carga humana instantánea dada por la Ec. (1). Obtenemos $\beta \sim Nc/Rc \sim 170$.

Como alternativa, podemos evaluar β utilizando datos reales del crecimiento de la población¹⁵ e insertándolos en la ecuación (1). En este caso obtenemos un rango $700 \approx \beta \approx 900$ que da un escenario ligeramente favorable para la especie humana (véase más adelante y la Fig. 4). Subrayamos de todos modos que este segundo escenario depende de muchos factores, entre ellos el hecho de que el período examinado en ¹⁵ es relativamente corto. Por el contrario, $\beta \sim 170$ se basa en el valor aceptado para la capacidad máxima de carga humana. Con respecto al valor del parámetro a_0 , adoptando los datos relativos a los años 2000-2012 de la ref., ¹⁰ tenemos

$$\frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta t} \approx \frac{1}{3 \times 10^7} \frac{2.3 \times 10^6}{12} \approx -a_0 N \Rightarrow a_0 \sim 10^{-12} \text{ years}^{-1} \quad (4)$$

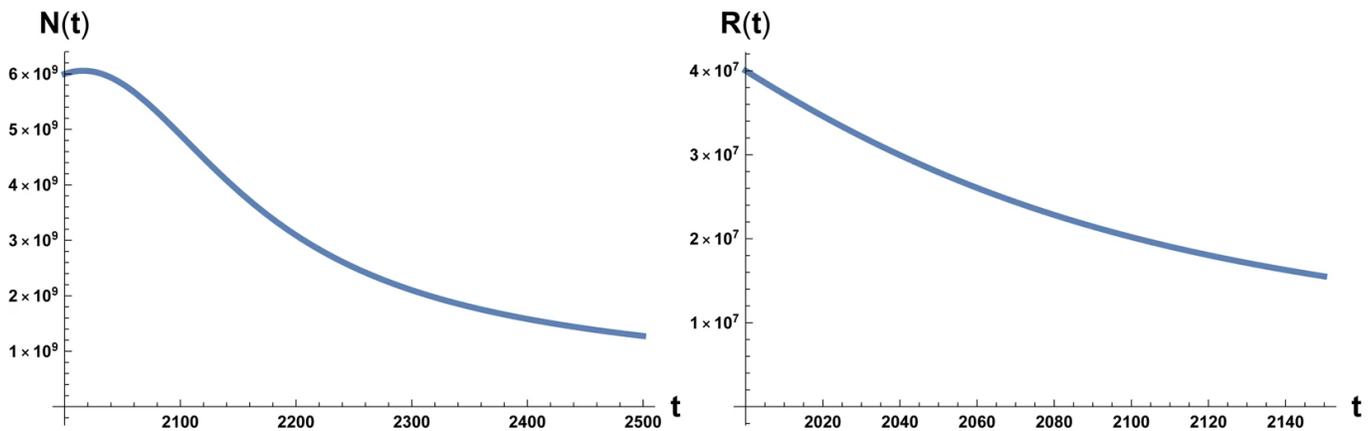
En las Figs. 1 y 2 se representa la evolución temporal del sistema Ec. (1) y Ec. (2). Observamos que en la Fig. 1 el valor numérico del máximo de la función $N(t)$ es $NM \sim 10^{10}$ estimado como la capacidad de carga de la población terrestre [14](#). Una vez más tenemos que subrayar que no es realista pensar que el declive de la población en una situación de fuerte degradación ambiental sea un declive no caótico y bien ordenado, es decir, que también tomamos el máximo de la población y el momento en que se produce como punto de referencia para la aparición de un colapso catastrófico irreversible, es decir, un punto de "no retorno".

Figura 1



A la izquierda: gráfico de la solución de la Ec. (1) con la condición inicial $N_0 = 6 \times 10^9$ en el momento inicial $t = 2000$ A.C. A la derecha: gráfico de la solución de la Ec. (2) con la condición inicial $R_0 = 4 \times 10^7$. Aquí $\beta = 700$ y $a_0 = 10^{-12}$.

Figura 2



A la izquierda: gráfico de la solución de la Ec. (1) con la condición inicial $N_0 = 6 \times 10^9$ en el momento inicial $t = 2000$ A.C. A la derecha: gráfico de la solución de la Ec. (2) con la condición inicial $R_0 = 4 \times 10^7$. Aquí $\beta = 700$ y $a_0 = 10^{-12}$.

Modelo estadístico de desarrollo tecnológico

Según la escala de Kardashev [7,8](#) para poder extenderse por el sistema solar, una civilización debe ser capaz de construir una esfera de Dyson,¹⁶ es decir, un aprovechamiento tecnológico máximo de la mayor parte de la energía de su estrella local, que en el caso de la Tierra con el Sol correspondería a un consumo energético de $ED \approx 4 \times 10^{26}$ vatios,

llamamos a este valor límite de Dyson. Nuestro consumo real de energía se estima en $E_c \approx 10^{13}$ vatios (Statistical Review of World Energy source).⁹ Para describir nuestra evolución tecnológica, podemos esquematizar aproximadamente el desarrollo como un proceso aleatorio dicotómico

$$\frac{d}{dt}T = \alpha T \xi(t). \quad (5)$$

donde T es el nivel de desarrollo tecnológico de la civilización humana que también podemos identificar con el consumo de energía. α es un parámetro constante que describe la tasa de crecimiento tecnológico (es decir, de T) y $\xi(t)$ una variable aleatoria con valores 0,1. Consideramos por tanto, basándonos en los datos de consumo energético mundial ^{5,6} un crecimiento exponencial con fluctuaciones que reflejan principalmente los cambios en la economía mundial. Consideramos, por tanto, un proceso de crecimiento exponencial modulado en el que las fluctuaciones de la tasa de crecimiento son captadas por la variable $\xi(t)$. Esta variable conmuta entre los valores 0,1 con tiempos de espera entre conmutaciones distribuidos con la densidad $\psi(t)$. Cuando $\xi(t) = 0$ el crecimiento se detiene y se reanuda cuando ξ cambia a $\xi(t) = 1$. Si consideramos que T describe más estrictamente el desarrollo tecnológico, $\xi(t)$ refleja el hecho de que las inversiones en investigación pueden tener interrupciones como consecuencia de la alternancia de períodos de crecimiento económico y de crisis. Con la siguiente transformación,

$$W = \log \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2\alpha} - 2\langle \xi \rangle t, \quad (6)$$

diferenciando ambos lados respecto a t y utilizando la Ec. (5), obtenemos para la variable transformada W

$$\frac{d}{dt}W = \bar{\xi}(t) \quad (7)$$

donde $\bar{\xi}(t) = 2[\xi(t) - \langle \xi \rangle]$ y $\langle \xi \rangle$ es el promedio de $\xi(t)$ para que $\bar{\xi}(t)$ tome los valores ± 1 .

La ecuación anterior se ha estudiado intensamente, y en la literatura se puede encontrar una solución general para la distribución de probabilidad $P(W, t)$ generada por una distribución genérica de tiempo de espera.¹⁷ Conociendo la distribución podemos evaluar la distribución del tiempo de primer paso en alcanzar el nivel tecnológico necesario para, por ejemplo, vivir en el espacio extraterrestre o desarrollar cualquier otra forma de mantener la población del planeta. Este tiempo característico debe compararse con el tiempo que se tardará en alcanzar el punto de no retorno. Conociendo la distribución del primer tiempo¹⁸ de paso podremos evaluar la probabilidad de sobrevivir de nuestra civilización.

Si el proceso dicotómico es un proceso poissoniano con tasa γ entonces la función de correlación es una exponencial, es decir

$$\langle \bar{\xi}(t) \bar{\xi}(t') \rangle = \exp[-\gamma|t - t'|] \quad (8)$$

y la Ec. (7) para la densidad de probabilidad genera la conocida ecuación del telegrafista

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} P(W, t) + \gamma \frac{\partial}{\partial t} P(W, t) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(W, t) \quad (9)$$

Señalamos que el enfoque que seguimos se basa en el supuesto de que en momentos aleatorios, distribuidos exponencialmente con una tasa γ , la variable dicotómica cambia de valor. Con este supuesto la solución de la Ec. (9) es

$$P(W, t) = \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{\gamma}{2}t\right] \left[\delta(t - |W|) + \frac{\gamma}{2} \left(I_0 \left[\frac{\gamma}{2} \sqrt{t^2 - W^2} \right] + \frac{t I_1 \left[\frac{\gamma}{2} \sqrt{t^2 - W^2} \right]}{\sqrt{t^2 - W^2}} \right) \theta(t - |W|) \right], \quad (10)$$

donde $I_n(z)$ es la función de Bessel modificada del primer tipo. Transformando de nuevo a la variable T tenemos

$$P(T, t) = \frac{1}{4} J e^{-\frac{\gamma}{2}t} \left[\delta(2t - x) + \delta(x) + \gamma \left(I_0 \left[\frac{\gamma}{2} \sqrt{(2t - x)x} \right] + \frac{t I_1 \left[\frac{\gamma}{2} \sqrt{(2t - x)x} \right]}{\sqrt{x(2t - x)}} \right) \right] \theta\left(t - \frac{x}{2}\right) \theta(x) \quad (11)$$

donde, por razones de compacidad, fijamos

$$x = \log(T/T_0)^{2/\alpha}, \quad J = \frac{dW}{dT} = \frac{2}{\alpha T} \quad (12)$$

En la transformación de Laplace tenemos

$$\hat{P}(T, s) = \frac{J}{2 \left(\frac{\gamma}{2} + s\right)} \left[\delta(x) + \frac{(\gamma + s)^2}{2 \left(\frac{\gamma}{2} + s\right)} \exp\left[-\frac{sx(\gamma + s)}{2 \left(\frac{\gamma}{2} + s\right)}\right] \right]. \quad (13)$$

La distribución del tiempo de primer paso, en la transformación de Laplace, se evalúa como¹⁹

$$\hat{f}_T(s) = \frac{\hat{P}(x, s)}{\hat{P}(x_1, s)} = \exp\left[-\frac{s(\gamma + s)(x - x_1)}{2 \left(\frac{\gamma}{2} + s\right)}\right], \quad x > x_1. \quad (14)$$

Al invertir la transformación de Laplace obtenemos

$$f_T(t) = \exp\left[-\frac{\gamma}{2}t\right] \frac{\gamma \sqrt{x-x_1} I_1 \left(\frac{\sqrt{x-x_1} \sqrt{t - \frac{x-x_1}{2}} \gamma}{\sqrt{2}} \right)}{2\sqrt{2} \sqrt{t - \frac{x-x_1}{2}}} \theta\left[t - \frac{x-x_1}{2}\right] + \exp\left[-\frac{\gamma}{2}t\right] \delta\left(t - \frac{x-x_1}{2}\right), \quad (15)$$

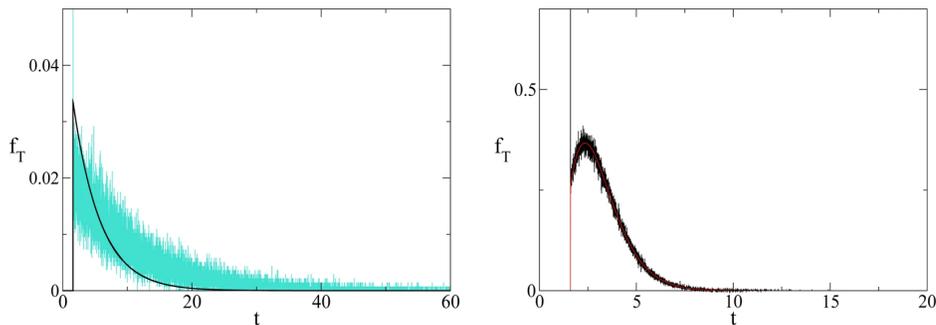
lo que se confirma (véase la Fig. 3) mediante simulaciones numéricas. El promedio de tiempo para obtener el punto x por primera vez viene dado por

$$\langle t \rangle = \int_0^\infty t f_T(t) dt = x - x_1 = \log(T/T_0)^{2/\alpha} - \log(T_1/T_0)^{2/\alpha} = \frac{2}{\alpha} \log\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (16)$$

que, curiosamente, es el doble del tiempo que se necesitaría si se produjera un crecimiento exponencial puro, depende de la relación entre el valor final y el inicial de T y es independiente de γ . También destacamos que este resultado

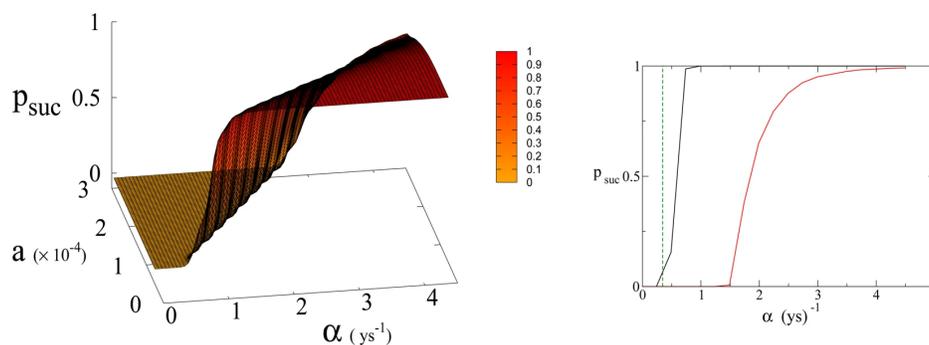
depende de parámetros directamente relacionados con la etapa de desarrollo de la civilización considerada, a saber, el valor inicial T_1 , que suponemos que es el consumo de energía E_c de la etapa plenamente industrializada de la evolución de la civilización y el valor final T , que suponemos que es el límite Dyson E_D , y la tasa de crecimiento tecnológico α . Para esta última podemos, de forma bastante optimista, elegir el valor $\alpha = 0,345$, siguiendo la Ley de Moore²⁰ (véase el siguiente apartado). Utilizando los datos anteriores, en relación con el escenario de nuestro planeta, obtenemos la estimación de $\langle t \rangle \approx 180$ años. A partir de las Figs. 1 y 2 vemos que la estimación del tiempo de no retorno son 130 y 22 años para $\beta = 700$ y $\beta = 170$ respectivamente, siendo este último el valor más realista. En cualquier caso, estas estimaciones basadas en valores medios, al ser inferiores a 180 años, ya presagian un resultado poco favorable para evitar un colapso catastrófico. No obstante, para estimar la probabilidad real de evitar el colapso no podemos basarnos en los valores medios, sino que tenemos que evaluar las trayectorias individuales y contar las que consiguen alcanzar el límite de Dyson antes del "punto de no retorno". Esto lo implementamos numéricamente como se explica a continuación.

Figura 3



(Izquierda) Comparación entre la predicción teórica de la Ecuación (15) (curva negra) y la simulación numérica de la Ecuación (3) (curva cian) para $\gamma = 4$ (unidades arbitrarias). (Derecha) Comparación entre la predicción teórica de la Ec. (15) (curva roja) y la simulación numérica de la Ec. (3) (curva negra) para $\gamma = 1/4$ (unidades arbitrarias).

Figura 4

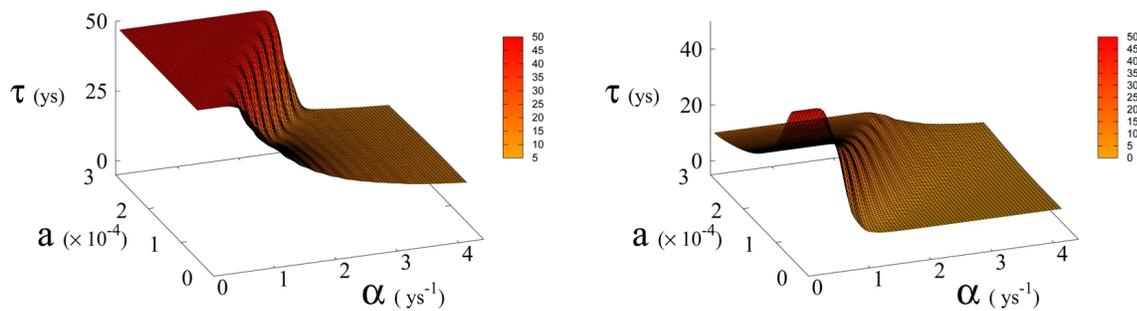


(Panel izquierdo) Probabilidad p_{suc} de alcanzar el valor Dyson antes de llegar al punto de "no retorno" en función de α y a para $\beta = 170$. El parámetro a se expresa en $\text{Km}^2 \text{ys}^{-1}$. (Panel derecho) Gráfico 2D de p_{suc} para $a = 1,5 \times 10^{-4} \text{ Km}^2 \text{ys}^{-1}$ en función de α . La línea roja es la p_{suc} para $\beta = 170$. Las líneas negras continuas (indistinguibles) son p_{suc} para $\beta = 300$ y 700 respectivamente (véase también la Fig. 6). La línea verde discontinua indica el valor de α correspondiente a la ley de Moore.

Resultados numéricos

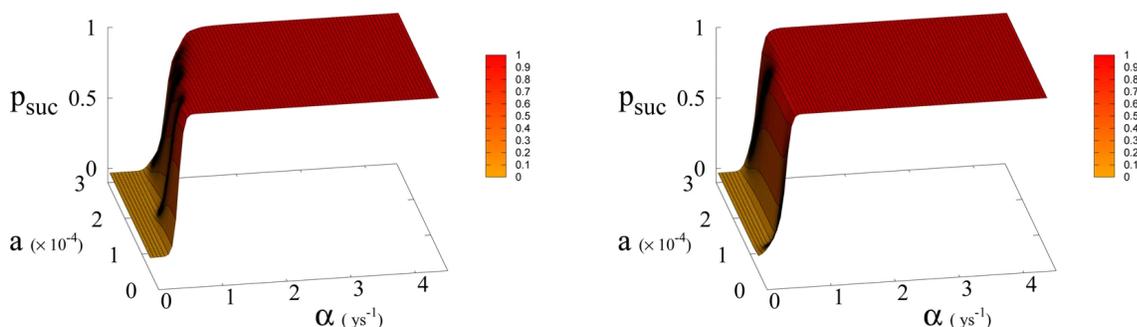
Realizamos simulaciones de las Ecs. (1), (2) y (5) simultáneamente para diferentes valores de los parámetros a_0 y α para β fijo y contamos el número de trayectorias que alcanzan el límite de Dyson antes de que el nivel de la población alcance el "punto de no retorno" tras el cual se produce un rápido colapso. Más concretamente, la evolución de T es estocástica debido al proceso aleatorio dicotómico $\xi(t)$, por lo que generamos las trayectorias de $T(t)$ y al mismo tiempo seguimos la evolución de la población y de la densidad del bosque dictada por la dinámica de las ecuaciones (1), (2) hasta que esta última dinámica alcanza el punto de no retorno (máximo de población seguido de colapso). Cuando esto ocurre, si la trayectoria en $T(t)$ ha alcanzado el límite de Dyson lo contamos como un éxito, en caso contrario como un fracaso. De este modo, determinamos las probabilidades y los tiempos medios relativos en las figuras 5, 6 y 7. Adoptando un punto de vista de sostenibilidad débil nuestro modelo no especifica el mecanismo tecnológico por el cual las trayectorias exitosas son capaces de encontrar una alternativa a los bosques y evitar el colapso, lo dejamos indefinido y lo vinculamos exclusivamente y de forma probabilística a la consecución del límite de Dyson. Es importante señalar que vinculamos el proceso de crecimiento tecnológico descrito por la Ecuación (5) al crecimiento económico y, por tanto, consideramos, tanto para el crecimiento económico como para el tecnológico, una secuencia aleatoria de ciclos de crecimiento y estancamiento, con periodos medios de aproximadamente 1 y 4 años, de acuerdo con las estimaciones para la economía mundial rectora, es decir, Estados Unidos, según la Oficina Nacional de Investigación Económica.²¹

Figura 5



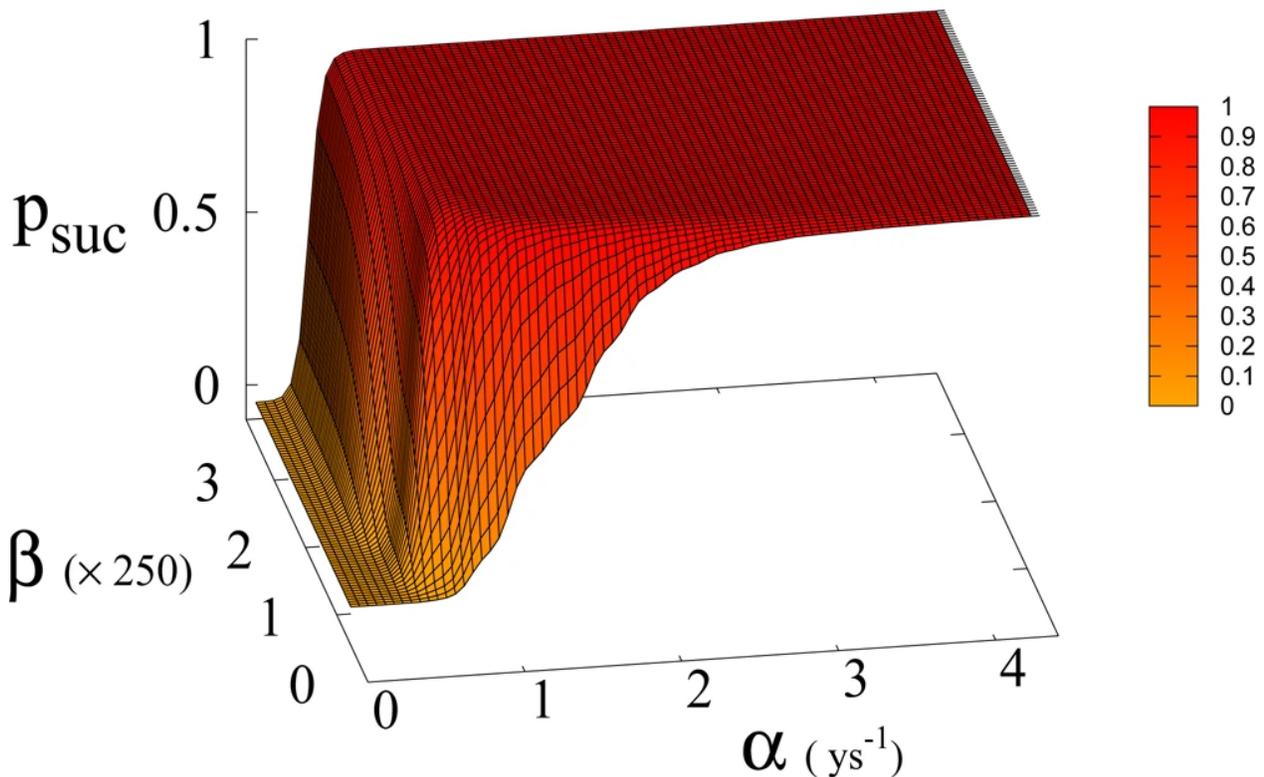
Tiempo medio τ (en años) para alcanzar el valor de Dyson antes de alcanzar el punto de "no retorno" (éxito, izquierda) y sin alcanzar el valor de Dyson (fracaso, derecha) en función de α y a para $\beta = 170$. Región de meseta (panel izquierdo) en la que $\tau \geq 50$ corresponde a τ divergente, es decir, que no se alcanza el valor de Dyson antes de llegar al punto de "no retorno" y, por tanto, al fracaso. La región de meseta en $\tau = 0$ (panel de la derecha), corresponde a que no se produce el fracaso, es decir, el éxito. El parámetro a se expresa en $\text{Km}^2 \text{ys}^{-1}$.

Figure 6



Probabilidad p_{suc} de alcanzar el valor Dyson antes de llegar al punto de "no retorno" en función de α y β para $\beta = 300$ (izquierda) y 700 (derecha). El parámetro a se expresa en $\text{Km}^2 \text{ys}^{-1}$.

Figura 7



Probabilidad de alcanzar el valor Dyson p_{suc} antes de llegar al punto de "no retorno" en función de β y α para $a = 1,5 \times 10^{-4} \text{ Km}^2 \text{ys}^{-1}$.

En la ecuación (1, 2) redefinimos las variables como $N' = N/RW$ y $R' = R/RW$ con $RW \approx 150 \times 10^6 \text{ Km}^2$ la superficie continental total, y sustituimos el parámetro a_0 en consecuencia con $a = a_0 \times RW = 1,5 \times 10^{-4} \text{ Km}^2 \text{ys}^{-1}$. Realizamos las simulaciones correspondientes partiendo de los valores R'_0 y N'_0 , basados respectivamente en la superficie forestal actual y en la población humana. Tomamos valores de a entre 10^{-5} y $3 \times 10^{-4} \text{ Km}^2 \text{ys}^{-1}$ y para α entre $0,01 \text{ ys}^{-1}$ y $4,4 \text{ ys}^{-1}$. Los resultados se muestran en las figuras 4 y 6. La figura 4 muestra un valor umbral para el parámetro α , la tasa de crecimiento tecnológico, por encima del cual existe una probabilidad de éxito no nula. Este valor umbral aumenta con el valor del otro parámetro a . Como se muestra en la Fig. 7, este valor depende también del valor de β y los valores más altos de β corresponden a un escenario más favorable en el que la transición a una probabilidad de éxito no nula se produce para α más pequeño, es decir, para valores más pequeños y accesibles, de la tasa de crecimiento tecnológico. Más concretamente, el panel izquierdo de la Fig. 4 muestra que, para el valor más realista $\beta = 170$, una región de valores de los parámetros con probabilidad no nula de evitar el colapso corresponde a valores de α mayores que 0,5. Por lo tanto, incluso suponiendo que la tasa de crecimiento tecnológico sea comparable al valor $\alpha = \log(2)/2 = 0,345 \text{ ys}^{-1}$, dado por la Ley de Moore (correspondiente a una duplicación del tamaño cada dos años), es poco probable que en este régimen se evite alcanzar el catastrófico "punto de no retorno". Cuando se adopta el valor realista de $a = 1,5 \times 10^{-4} \text{ Km}^2 \text{ys}^{-1}$ estimado a partir de la Ec. (4), se obtiene, de hecho, una probabilidad inferior al 10% de evitar el colapso con

una tasa de crecimiento de Moore, incluso cuando se adopta el escenario más optimista correspondiente a $\beta = 700$ (curva negra en el panel derecho de la Fig. 4). Mientras que se necesita un α mayor que 1,5 para tener una probabilidad no nula de evitar el colapso cuando $\beta = 170$ (curva roja, mismo panel). En cuanto a las escalas de tiempo, el panel derecho de la Fig. 5 muestra para $\beta = 170$ que incluso en el rango $\alpha > 0,5$, correspondiente a una probabilidad no nula de evitar el colapso, éste sigue siendo posible, y cuando esto ocurre, el tiempo medio hasta el "punto de no retorno" oscila entre 20 y 40 años. El panel izquierdo de la misma figura muestra, para los mismos parámetros, que para evitar la catástrofe, nuestra sociedad tiene que alcanzar el límite de Dyson en el mismo tiempo medio de 20-40 años.

En la Fig. 7 mostramos la dependencia del modelo del parámetro β para $\alpha = 1,5 \times 10^{-4}$.

Métodos

Realizamos simulaciones de las ecuaciones (1), (2) y (5) simultáneamente para diferentes valores de los parámetros a_0 y α en función de β como se explica en Métodos y Resultados para generar las Figs. 5, 6 y 7. Las ecuaciones (1), (2) se integran mediante el método de Euler estándar. La ecuación (5) se integra también mediante el método de Euler estándar entre los cambios aleatorios de la variable ξ . El proceso estocástico dicotómico ξ se genera numéricamente de la siguiente manera: utilizando el generador de números aleatorios de la biblioteca gsl generamos los intervalos de tiempo entre los cambios de la variable dicotómica $\xi = 0, 1$, con una distribución exponencial (con valores medios de 1 y 4 años respectivamente), obtenemos por tanto una serie temporal de 0 y 1 para cada trayectoria. A continuación, integramos la Ec. (5) en el tiempo utilizando esta serie temporal y promediamos sobre $N = 10000$ trayectorias. Este último procedimiento se utiliza para llevar a cabo las simulaciones de las Figs. 3 y 4, con el fin de evaluar las probabilidades del primer tiempo de paso. Todas las simulaciones se implementan en C++.

Paradoja de Fermi

En esta sección discutimos brevemente algunas consideraciones sobre la llamada paradoja de Fermi que pueden extraerse de nuestro modelo. De hecho, podemos relacionar la paradoja de Fermi con el problema del consumo de recursos y la autodestrucción de una civilización. El origen de la paradoja de Fermi se remonta a una conversación casual sobre la vida extraterrestre que Enrico Fermi mantuvo con E. Konopinski, E. Teller y H. York en 1950, durante la cual Fermi formuló la famosa pregunta "¿dónde está todo el mundo?", que desde entonces se ha convertido en el epónimo de la paradoja. A partir de la ecuación de Drake,^{22,23} estrechamente relacionada, utilizada para estimar el número de civilizaciones extraterrestres en la Vía Láctea, el debate en torno a este tema ha sido especialmente intenso en el pasado (para una cobertura más completa nos remitimos a Hart,²⁴ Freitas²⁵ y su referencia). La conclusión de Hart es que no hay otras civilizaciones avanzadas o "tecnológicas" en nuestra galaxia, como también se ha apoyado recientemente²⁶ basándose en un cuidadoso reexamen de la ecuación de Drake. En otras palabras, la civilización terrestre debería ser la única que vive en la Vía Láctea. Estas conclusiones siguen siendo objeto de debate, pero sin duda muchos de los argumentos de Hart siguen siendo válidos, mientras que otros deben ser rediscutidos o actualizados. Por ejemplo, también existe la posibilidad de que evitar la comunicación sea en realidad una elección "inteligente" y una posible explicación de la paradoja. En varias ocasiones públicas, de hecho, el profesor Stephen Hawking sugirió que la humanidad debería ser muy cautelosa a la hora de establecer contacto con la vida extraterrestre. Más concretamente, cuando se le preguntó sobre el potencial del planeta Gliese 832c para la vida extraterrestre, dijo en una ocasión "Un día podríamos recibir una señal de un planeta como éste, pero deberíamos ser cautelosos a la hora de responder". De hecho, la historia de la humanidad ha estado salpicada de enfrentamientos entre diferentes civilizaciones y culturas que deberían servir de advertencia. Desde el reemplazo relativamente suave entre neandertales y Homo Sapiens (Kolodny²⁷) hasta el violento enfrentamiento entre nativos estadounidenses y europeos, los ejemplos históricos de choques y

La autodestrucción como consecuencia de la degradación del medio ambiente es una posibilidad cada vez más alarmante.

extinciones de culturas y civilizaciones han sido muy numerosos. Si observamos la historia de la humanidad, la sugerencia de Hawking parece una sabia advertencia y no podemos descartar la posibilidad de que las sociedades

extraterrestres sigan consejos similares procedentes de sus mejores mentes.

Con la ayuda de las nuevas tecnologías capaces de observar sistemas planetarios extrasolares, la búsqueda y el contacto con la vida extraterrestre se está convirtiendo en una posibilidad concreta (véase, por ejemplo, Grimaldi²⁸ para un

Las sociedades modernas se rigen por la economía y, sin dar aquí una definición bien detallada de "sociedad económica", podemos convenir en que ese tipo de sociedad privilegia el interés de sus componentes con menos o ninguna consternación por el conjunto del ecosistema que los alberga.

estudio sobre la posibilidad de detectar inteligencia extraterrestre), por lo que un debate sobre la probabilidad de que esto ocurra es una oportunidad importante para evaluar también nuestra situación actual como civilización. Entre los argumentos de Hart, la hipótesis de la autodestrucción necesita especialmente ser rediscutida a un nivel más profundo. La autodestrucción como

consecuencia de la degradación del medio ambiente es una posibilidad cada vez más alarmante. Mientras que los acontecimientos violentos, como las guerras mundiales o las catástrofes naturales, son motivo de consternación inmediata para todo el mundo, un consumo relativamente lento de los recursos planetarios puede no percibirse con tanta fuerza como un peligro mortal para la civilización humana. De hecho, las sociedades modernas se rigen por la

Aunque las formas de vida inteligentes fueran muy comunes sólo muy pocas civilizaciones serían capaces de alcanzar un nivel tecnológico suficiente como para extenderse en su propio sistema solar antes de colapsar debido al consumo de recursos.

economía y, sin dar aquí una definición bien detallada de "sociedad económica", podemos convenir en que ese tipo de sociedad privilegia el interés de sus componentes con menos o ninguna consternación por el conjunto del ecosistema que los alberga (para más detalles, véase una reseña sobre la economía ecológica y sus críticas a la

economía dominante²⁹). Ejemplos claros de las consecuencias de este tipo de sociedades son los acuerdos internacionales sobre el Cambio Climático. El acuerdo climático de París,^{30,31} de hecho, es sólo el último ejemplo de un acuerdo débil debido a su fuerte subordinación a los intereses económicos de los países individuales. En contraposición a este tipo de sociedad, tal vez debamos redefinir un modelo diferente de sociedad, una "sociedad cultural", que de alguna manera privilegie el interés del ecosistema por encima del interés individual de sus componentes, pero

Si somos una excepción en el Universo tenemos una alta probabilidad de colapsar o extinguirnos, mientras que si asumimos el principio de mediocridad, muy pocas civilizaciones son capaces de alcanzar un nivel tecnológico suficiente como para extenderse en su propio sistema solar antes de que el consumo de los recursos desencadene un colapso poblacional catastrófico.

eventualmente en función del interés comunal global.

Esta consideración sugiere una explicación estadística de la paradoja de Fermi: aunque las formas de vida inteligentes fueran muy comunes (de acuerdo con el principio de mediocridad en una de sus versiones:³² "el sistema solar y el planeta Tierra no tienen nada de especial") sólo muy pocas civilizaciones serían capaces de alcanzar un nivel tecnológico suficiente

como para extenderse en su propio sistema solar antes de colapsar debido al consumo de recursos.

Somos conscientes de que se pueden plantear varias objeciones contra este argumento y a continuación discutimos la que consideramos más importante. La principal objeción es que no sabemos nada sobre la vida extraterrestre. En consecuencia, no sabemos el papel que juega una hipotética inteligencia en el ecosistema del planeta. Por ejemplo, no necesariamente el planeta necesita árboles (o su equivalente) para su ecosistema. Además la forma de vida inteligente

podría ser ella misma el análogo de nuestros árboles, evitando así el problema de la "deforestación" (o su análogo). Pero si suponemos que no somos una excepción (principio de mediocridad) entonces, independientemente de la estructura del ecosistema extraterrestre, la forma de vida inteligente explotaría todo tipo de recursos, desde las rocas hasta los recursos orgánicos (animales/vegetales/etc.), evolucionando hacia una situación crítica. Aunque estamos en los inicios de la planetología extrasolar, tenemos fuertes indicios de que los planetas similares a la Tierra tienen una magnitud de volumen del orden de nuestro planeta. En otras palabras, los recursos de que disponen las civilizaciones extraterrestres son, como orden de magnitud, los mismos para todas ellas, incluidos nosotros. Además, el tiempo medio para alcanzar el límite de Dyson, tal como se deriva de la Ecuación 6, depende sólo de la relación entre el valor final y el inicial de T y, por tanto, sería independiente del tamaño del planeta, si asumimos como proxy de T el consumo de energía (que escala con el tamaño del planeta), produciendo un resultado bastante general que puede extenderse a otras civilizaciones. Siguiendo esta línea de pensamiento, si somos una excepción en el Universo tenemos una alta probabilidad de colapsar o extinguirnos, mientras que si asumimos el principio de mediocridad nos lleva a concluir que muy pocas civilizaciones son capaces de alcanzar un nivel tecnológico suficiente como para extenderse en su propio

Incluso asumiendo el principio de mediocridad, la respuesta a "¿Dónde está todo el mundo?" podría ser un lúgubre "(casi) todo el mundo está muerto".

sistema solar antes de que el consumo de los recursos de su planeta desencadene un colapso poblacional catastrófico. El principio de mediocridad ha sido cuestionado (véase, por ejemplo, Kukla³³ para una discusión crítica al respecto) pero, por otro lado, la idea de que la humanidad es de alguna manera "especial" en el universo ha sido

históricamente cuestionada en varias ocasiones. Empezando por la idea de que la Tierra es el centro del universo (geocentrismo), luego del sistema solar como centro del universo (heliocentrismo) y finalmente nuestra galaxia como centro del universo. Todas estas creencias han sido desmentidas por los hechos. Nuestra discusión, centrada en el consumo de recursos, muestra que tanto si asumimos el principio de mediocridad como nuestra "unicidad" como especie inteligente en el universo, la conclusión no cambia. Dando un significado muy amplio al concepto de civilización cultural como una civilización no fuertemente gobernada por la economía, sugerimos para evitar el colapso³⁴ que sólo las civilizaciones capaces de pasar de una sociedad económica a una especie de sociedad "cultural" de manera oportuna, pueden sobrevivir. Esta discusión nos lleva a la conclusión de que, incluso asumiendo el principio de mediocridad, la respuesta a "¿Dónde está todo el mundo?" podría ser un lúgubre "(casi) todo el mundo está muerto".

Conclusiones

En conclusión, nuestro modelo muestra que un colapso catastrófico de la población humana, debido al consumo de recursos, es el escenario más probable de la evolución dinámica basado en los parámetros actuales. Adoptando un modelo combinado determinista y estocástico, concluimos desde un punto de vista estadístico que la probabilidad de que nuestra civilización se sobreviva a sí misma es inferior al 10% en el escenario más optimista. Los cálculos muestran

La probabilidad de que nuestra civilización se sobreviva a sí misma es inferior al 10% en el escenario más optimista.

que, manteniendo el ritmo actual de crecimiento de la población y de consumo de recursos, en particular de los bosques, nos quedan unas pocas décadas antes de un colapso irreversible de nuestra civilización (véase la Fig. 5). Agravando aún más la situación, insistimos una vez más en que no es realista pensar que el declive de la población en una situación de fuerte degradación medioambiental sea un declive no caótico y bien ordenado. Esta consideración conduce a un tiempo restante aún más corto. Es cierto que en nuestro análisis asumimos como constantes parámetros como el crecimiento de la población y la tasa de deforestación en nuestro modelo. Se trata de una aproximación que nos permite predecir los escenarios futuros basándonos en las condiciones actuales. No obstante, los tiempos medios resultantes para que se produzca un resultado catastrófico, que son del orden de 2 a 4 décadas (véase la Fig. 5), hacen que esta aproximación sea aceptable, ya que es

difícil imaginar, en ausencia de esfuerzos colectivos muy fuertes, que se produzcan grandes cambios de estos parámetros en esa escala de tiempo. Este intervalo de tiempo parece estar fuera de nuestro alcance y ser incompatible

Sugerimos para evitar el colapso que sólo las civilizaciones capaces de pasar de una sociedad económica a una especie de sociedad "cultural" de manera oportuna, pueden sobrevivir.

con el ritmo real de consumo de recursos en la Tierra, aunque es posible que se produzcan algunas fluctuaciones en torno a esta tendencia,³⁵ no sólo debido a los efectos imprevistos del cambio climático, sino también a la deseable reforestación impulsada por el hombre. Este escenario ofrece también una

explicación adicional plausible al hecho de que no se detecten señales de otras civilizaciones. De hecho, según la ecuación (16), el tiempo medio para alcanzar la esfera de Dyson depende de la relación del nivel tecnológico T y, por lo tanto, asumiendo el consumo de energía (que escala con el tamaño del planeta) como proxy de T , dicha relación es aproximadamente independiente del tamaño del planeta. Basándose en esta observación y en el principio de mediocridad, se podrían ampliar los resultados mostrados en este trabajo y concluir que una civilización genérica tiene aproximadamente dos siglos a partir de su edad industrial plenamente desarrollada para alcanzar la capacidad de extenderse por su propio sistema solar. De hecho, dando un significado muy amplio al concepto de civilización cultural como una civilización no fuertemente regida por la economía, sugerimos que sólo pueden sobrevivir las civilizaciones capaces de pasar de una sociedad económica a una especie de sociedad "cultural" en el momento oportuno.

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
- Alejandro Pedregal y Juan Bordera: [Hacia un Decrecimiento Ecosocialista](#)
- Los Editores de Monthly Review: [Notas sobre el Tiempo se Acaba](#)
- Jordan Fox Besek: [Construyendo la Visión del Buen Vivir](#)
- John Bellamy Foster, John Molyneux y Owen McCormack: [Contra los Escenarios del Día del Juicio Final: ¿Qué Hacer Ahora?](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [Los Delirios Fraudulentos del Capitalismo Verde](#)
- John Bellamy Foster y Haris Golemis: [La Fractura Planetaria](#)
- Christine Corlet Walker, Angela Druckman, Tim Jackson: [Sistemas de Bienestar sin Crecimiento Económico](#)
- John Bellamy Foster: [El Sentido del Trabajo en una Sociedad Sostenible](#)
- Simon Mair, Angela Druckman y Tim Jackson: [Una Historia de Dos Utopías: El Trabajo en un Mundo Post-Crecimiento](#)
- Álvaro de Regil Castilla: [Transitando a Geocracia Paradigma de la Gente y el Planeta y No el Mercado — Primeros Pasos](#)
- John O'Neill: [La Vida Más Allá del Capital](#)

- ¹ Horton R, Beaglehole R, Bonita R, Raeburn J, McKee M, Wall S. From public to planetary health: a manifesto. *Lancet* 2014; 383: 847.
- ² The State of the World's Forests 2018. Forest Pathways to Sustainable Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome (2018).
- ³ Bologna, M. & Flores, J. C. A simple mathematical model of society collapse applied to Easter Island. *EPL* **81**, 48006 (2008).
- ⁴ Bologna, M., Chandia, K. J. & Flores, J. C. A non-linear mathematical model for a three species ecosystem: Hippos in Lake Edward. *Journal of Theoretical Biology* **389**, 83 (2016).
- ⁵ U.S. Energy Information Administration (EIA), <https://www.eia.gov/international/data/world>.
- ⁶ Vaclav, S. Energy transitions: history, requirements, prospects (ABC-CLIO, 2010).
- ⁷ Kardashev, N. Transmission of Information by Extraterrestrial civilisations. *Soviet Astronomy* **8**, 217 (1964).
- ⁸ Kardashev, N. On the Inevitability and the Possible Structures of Supercivilisations, The search for extraterrestrial life: Recent developments; Proceedings of the Symposium p. 497–504 (1985).
- ⁹ Statistical Review of World Energy source (2018).
- ¹⁰ NASA source <https://svs.gsfc.nasa.gov/11393>.
- ¹¹ Frank, A., Carroll-Nellenback, J., Alberti, M. & Kleidon, A. The Anthropocene Generalized: Evolution of Exo-Civilizations and Their Planetary Feedback. *Astrobiology* **18**, 503–517 (2018).
- ¹² Fort, J. & Mendez, V. Time-Delayed Theory of the Neolithic Transition in Europe. *Phys. Rev. Lett.* **82**, 867 (1999).
- ¹³ Molles, M. *Ecology: Concepts and Applications* (McGraw-Hill Higher Education, 1999).
- ¹⁴ Wilson, E. O. *The Future of Life* (Knopf, 2002).
- ¹⁵ Bongaarts, J. Human population growth and the demographic transition. *Phil. Trans. R. Soc. B* **364**, 2985–2990 (2009).
- ¹⁶ Dyson, F. J. Search for Artificial Stellar Sources of Infra-Red Radiation. *Science* **131**, 1667–1668 (1960).
- ¹⁷ Bologna, M., Ascolani, G. & Grigolini, P. Density approach to ballistic anomalous diffusion: An exact analytical treatment. *J. Math. Phys.* **51**, 043303 (2010).
- ¹⁸ Hanggi, P. & Talkner, P. First-passage time problems for non-Markovian processes. *Phys. Rev. A* **32**, 1934 (1985).
- ¹⁹ Weiss G. H. *Aspects and Applications of the Random Walk*, (North Holland, 1994).
- ²⁰ Moore, G. E. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics* **38**, 114 (1965).
- ²¹ Business Cycle Expansion and Contractions, <https://web.archive.org/web/20090310081706/>; <http://www.nber.org/cycles>.
- ²² Drake, F. The radio search for intelligent extraterrestrial life. In *Current Aspects of Exobiology* 323–345 (Pergamon Press, New York, 1965).
- ²³ Burchell, M. J. W(h)ither the Drake equation? *Intern. J. Astrobiology* **5**, 243–250 (2006).
- ²⁴ Hart, M. H. Explanation for the Absence of Extraterrestrials on Earth. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **16**, 128–135 (1975).
- ²⁵ Freitas, R. A. There is no Fermi Paradox. *Icarus* **62**, 518–520 (1985).
- ²⁶ Engler, J. O. & von Wehrden, H. Where is everybody?? An empirical appraisal of occurrence, prevalence and sustainability of technological species in the Universe. *International Journal of Astrobiology* **18**, 495–501 (2019).
- ²⁷ Kolodny, O. & Feldman, M. W. A parsimonious neutral model suggests Neanderthal replacement was determined by migration and random species drift. *Nature Comm.* **8**, 1040 (2017).
- ²⁸ Grimaldi, C. Signal coverage approach to the detection probability of hypothetical extraterrestrial emitters in the Milky Way. *Sci. Rep.* **7**, 46273 (2017).
- ²⁹ Daly, H. E. & Farley, J. *Ecological Economics, Second Edition: Principles and Applications* (Island Press, 2011).
- ³⁰ Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english.pdf.
- ³¹ Tol, R. S. J. The structure of the climate debate. *Energy Policy* **104**, 431–438 (2017).
- ³² Rood, R. T. & Trefil, S. J. *Are we alone? The possibility of extraterrestrial civilisations* (Scribner, 1981).
- ³³ Kukla, A. *Extraterrestrials A Philosophical Perspective* (Lexington Books, 2010).
- ³⁴ Strunz, S., Marselle, M. & Schröter, M. Leaving the “sustainability or collapse” narrative behind. *Sustainability Science* **14**, 1717–1728 (2019).
- ³⁵ Song, X.-P. *et al.* Global land change from 1982 to 2016. *Nature* **560**, 639–643 (2018).

- ❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un etos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.
- ❖ **Acerca de los autores:** Mauro Bologna es Investigador Físico en el Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile. Gerardo Aquino es investigador en Redes Complejas, Biología de Sistemas, Procesos Estocásticos, Mecánica Estadística y Matemática Aplicada en el Instituto Alan Turing, Universidad de Londres, Imperial College.
- ❖ **Sobre este ensayo:** Deforestación y Sostenibilidad de la Población Mundial: un Análisis Cuantitativo fue publicado originalmente en inglés por [Scientific Reports, Springer Nature in May 2020](#). Este artículo ha sido publicado bajo [Creative Commons, Atribución 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](#). Se puede reproducir el material para uso no comercial, acreditando al autor y proporcionando un enlace al editor original.
- ❖ **Citar este trabajo como:** Mauro Bologna y Gerardo Aquino: Deforestación y Sostenibilidad de la Población Mundial: un Análisis Cuantitativo – La Alianza Global Jus Semper, agosto de 2022.
- ❖ **Agradecimientos:** M.B. y G.A. agradecen a Phy. C.A. por su apoyo logístico. Contribuciones de los autores: M.B. y G.A. contribuyeron por igual y revisaron el manuscrito. Intereses competitivos: Los autores declaran no tener intereses en competencia.
- ❖ **Etiquetas:** Sociedad económica, sociedad cultural, autodestrucción, cambio climático, deforestación, agotamiento de recursos, colapso poblacional, paradoja de Fermi.
- ❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

© 2022. La Alianza Global Jus Semper
Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html
Correo-e: informa@jussemper.org