

INGENIERÍA DE LA BIOSFERA MEDIANTE ORGANISMOS SINTÉTICOS: UNA ALTERNATIVA AL CAMBIO CLIMÁTICO

por RAÚL MONTAÑEZ^{1,2,3}, SALVA DURÁN-NEBREDA^{1,2}, RICARD SOLÉ^{1,2,4}

¹ICREA-COMPLEX SYSTEMS LAB, PRBB, C/ AIGUADER 88, 08003 - BARCELONA

²INSTITUTO DE BIOLOGÍA EVOLUTIVA (UPF-CSIC), ³ INSTITUTO DE SALUD CARLOS III, CIBERER, ⁴SANTA FE INSTITUTE

RAULEMM@GMAIL.COM

Palabras clave: ingeniería ecológica, biología sintética, cambio climático.

Enviado: 28 febrero 2016. Aceptado: 10 marzo 2016

Nuestro planeta está experimentando un acelerado proceso de cambio como consecuencia de las actividades antropogénicas. El futuro de esta transformación es incierto, pero hay un consenso generalizado sobre las consecuencias negativas que su devenir causará a nuestra propia supervivencia. Pero esto no es todo, es bastante probable que este cambio se dé de modo abrupto, catastrófico, pese a que hasta el momento, la progresiva acumulación de gases de efecto invernadero y la degradación de los ecosistemas hayan parecido inocuas. Una posible alternativa a este futuro incierto es el diseño de organismos sintéticos, capaces de reproducirse y expandirse a escala geográfica con el objetivo de lograr, a largo plazo, una restauración de la homeostasis en los ecosistemas. Una ingeniería de este tipo, de escala regional o incluso planetaria, debería de contemplar y gestionar la complejidad de nuestra biosfera. Se requerirá no sólo un diseño adecuado de los organismos, sino también la comprensión de su lugar dentro de las redes ecológicas y de su capacidad de evolución. Este probable escenario futuro requerirá la integración de ideas procedentes de dominios actualmente débilmente conectados, que incluyen la biología sintética, la ingeniería ecológica y genética, las teorías evolutivas, la climatología, la biogeografía y la ecología de las invasiones, entre otros.

Our planet is experiencing an accelerated process of change associated to a variety of anthropogenic phenomena. The future of this transformation is uncertain, but there is general agreement about its negative unfolding that might threaten our own survival. Furthermore, the pace of the expected changes is likely to be abrupt: catastrophic shifts might be the most likely outcome of this ongoing, apparently slow process, associated to carbon dioxide accumulation or ecosystem degradation. What we propose as an alternative to this possible future is the design of synthetic organisms, capable of reproducing and expanding to large geographic scales with the goal of achieving a long term or a transient restoration of ecosystem-level homeostasis. Such a regional or even planetary scale engineering would have to deal with the complexity of our biosphere. It will require not only a proper design of organisms but also understanding their place within ecological networks and their evolvability. This is a likely future scenario that will require integration of ideas coming from currently weakly connected domains, including synthetic biology, ecological and genome engineering, evolutionary theory, climate science, biogeography and invasion ecology, among others.

Introducción

Somos una devastadora fuerza geológica. Esta afirmación puede resultar atrevida pues un *Homo sapiens* promedio, de unos 80 kg y 175 cm, no supone una amenaza para la tierra. Nuestro poder reside en nuestras sociedades. Un solo individuo de *Eciton burchellii* no supone una grave amenaza para un ratón del mismo modo que una sola *Amitermes meridionalis* jamás podría moldear el paisaje australiano. Sin embargo, cuando una de estas colonias alcanza un tamaño crítico, ciertos comportamientos individuales se amplifican, De ellas emerge una inteligencia colectiva que permite a unos, hormigas guerreras, cazar pequeños vertebrados y a los otros, termitas, construir espectaculares termiteros. Si nos asombramos

de la capacidad de modificar el entorno de unas pocas miles de hormigas o termitas, qué no podemos esperar de una colonia de 7 376 471 981 individuos y con una mayor riqueza de comportamiento, sofisticados métodos de comunicación y capaces de utilizar toda clase de herramientas.

Ciertamente, las colonias de humanos (aunque actualmente podríamos hablar ya de una única colonia gigantesca, similar a las de *Linepithema humile*) son sorprendentes. Durante el Holoceno, la estabilidad climática permitió a esta colonia de *Homo sapiens* florecer como especie dominante y creativa y expandirse alrededor del globo, pero hasta la llegada de la revolución industrial su número se mantenía por debajo de mil millones de habitantes. La revolución

industrial permitió la explotación de un recurso energético que la tierra había estado acumulando durante millones de años, los combustibles fósiles y con ello llegó una nueva era, el Antropoceno, a partir de la cual la huella del ser humano sobre el clima, los recursos geológicos y la biodiversidad se ha acrecentado de modo gradual y continuo. Hemos empujado a la tierra a los límites de su capacidad reguladora, poniendo en peligro nuestras propias estructuras sociales y económicas. Durante este periodo hemos consumido la mayoría de los recursos fósiles, hemos alterado los ciclos hidrológicos y geoquímicos y hemos invadido y modificado el 75 % de los ecosistemas. Anualmente, liberamos 2 ppm (partes por millón, en atmósferas) de dióxido de carbono a la atmósfera y ésta acumula ya 400 ppm. Los niveles seguros de CO₂ atmosférico están alrededor de las 350 ppm. La acumulación de plásticos en los océanos alcanza ya las 269 000 toneladas métricas y ha comenzado a trasladarse ya a las cadenas tróficas. El hielo acumulado en los polos se reduce a una velocidad alarmante, se ha perdido un 40 % desde 1960, según los datos de la NASA. El límite seguro de reducción de la biodiversidad es de 10 especies por millón de especies y por año. Actualmente este valor está por encima de la centena. Muchos ecosistemas están dando señales de un descenso rápido hacia estados degradados o altamente degradados. Un ejemplo de esto pueden ser las cadenas tróficas oceánicas en las que se empiezan a notar alteraciones en la distribución y población de los productores primarios, o los ecosistemas áridos y semiáridos, donde el incremento de las temperaturas, la disminución constante de las precipitaciones y el aumento del pastoreo están propiciando la desertización. Así mismo, los ecosistemas de la selva tropical, los arrecifes de coral o los bosques boreales, entre otros, también podrían estar enfrentando serios problemas de empobrecimiento ecológico.

Cada vez son más las evidencias que indican que nuestro planeta podría experimentar un cambio irreversible en el clima como consecuencia del continuo aumento de las temperaturas y de la sobreexplotación de los recursos. Los modelos climáticos predicen un cambio abrupto en la temperatura una vez que se superen las condiciones de no retorno. Para entender esto mejor podemos ayudarnos de una metáfora tan simple como un montón de arena. Si sobre una superficie plana comenzamos a dejar caer arena grano a grano, Estos granos se irán acumulando progresivamente, gracias al efecto de la fricción, formando una pila. A medida que se va formando esta pila, la pendiente de su talud se irá haciendo cada vez más acusada. Pasado un cierto umbral, la fricción no podrá ya retener los granos y comenzarán las avalan-

chas. El primer grano en moverse arrastrará consigo otros granos creando una reacción en cadena. Después de que unas docenas de granos se hayan puesto a rodar, la avalancha podría perder fuerza o podría continuar propagándose hasta que prácticamente toda la ladera se desmorone. He aquí el punto crucial de esta metáfora: desconocemos cuál será el grano que desencadene la avalancha, así como la magnitud de esta, pero sabemos que superada una pendiente crítica las avalanchas comenzarán a aparecer.

El clima es un sistema comparable al montón de arena, de modo que la acumulación de cambios graduales en las variables de control del sistema (como la temperatura o las concentraciones de gases de efecto invernadero) es amortiguada por los diferentes mecanismos de compensación (la fricción). Pero como hemos visto en el ejemplo del montón de arena, existe una capacidad máxima de carga a partir de la cual se desencadenará un cambio catastrófico.

Lo primero que cualquier mente sensata se plantearía es frenar las emisiones de gases de efecto invernadero y el deterioro medioambiental. Pero la realidad en la que vivimos es mucho más compleja. Los países en vías de desarrollo deben desarrollarse, y la inercia del libre mercado y la voracidad del consumismo son extremadamente difíciles de frenar. A todo esto hemos de sumar la reticencia a tomar decisiones destinadas a cambiar el *status quo*. A principios de los años 30, Estados Unidos sufrió uno de los mayores desastres ecológicos del siglo XX asociado a los cultivos intensivos y a una pésima gestión de los suelos. Tras años de este tipo de prácticas, las gramíneas de las grandes llanuras de la meseta americana habían sido sustituidas por trigo. Tras un periodo de copiosas lluvias, que propició la expansión de los monocultivos, en 1930 se inicia un largo periodo de sequía que arrasó las plantaciones de trigo dejando el suelo completamente desprotegido. Los conservacionistas iniciaron campañas para la mejora a la gestión de los suelos, a lo que el presidente Andrew Jackson respondió:

Qué hombre de bien preferiría un país cubierto por bosques y habitado por unos miles de salvajes a nuestra extensa república, sembrada de pueblos, ciudades y prósperas granjas, embellecida con todas las mejoras del arte o la industria, ocupada por más de 12 000 000 de gente feliz y dotada de todas las bendiciones de la libertad, la civilización y la religión.

Entre 1932 y 1939, las tormentas de arena asolaron Estados Unidos. La intensidad de las tormentas era tal que sumían a las poblaciones en la oscuridad.

Cuando se levantaba una tormenta, los granjeros, a modo de astronautas agrarios, habían de atar una cuerda al porche de casa para poder salir a buscar a los caballos o asegurar las carretas (Figura 1). Tres millones de habitantes abandonaron sus granjas propiando una oleada migratoria hacia la costa oeste.



Figura 1. Dallas, Dakota del Sur, 1936. Créditos

Nuestra sociedad es un ejemplo recurrente de mala gestión ecológica y de decisiones tomadas a destiempo. La superación del régimen lineal de las variables climáticas tendrá un efecto global, no habrá donde migrar. Nuestras sociedades colapsarán, dejarán de existir tal como las conocemos. Así pues, hemos de buscar alternativas. Los escenarios que se plantean para contrarrestar estos efectos implican promover prácticas sostenibles de desarrollo y producción, desacelerando las tasas de deterioro actuales, pero también se ha trabajar en remediar el daño ya causado. El secuestro de carbono mediante los sistemas de captación o las inyecciones en el manto resulta extremadamente costoso. Las estrategias de georingiería, como la fumigación de la atmósfera con polímeros capaces de arrastrar los contaminantes hacia el suelo en su caída, o el enriquecimiento de los océanos con hierro o fósforo para acelerar el metabolismo de autótrofos oceánicos e incrementar la fijación de CO₂, entre otros. Pese a ello, ninguna de estas intervenciones parece suficiente como para revertir las condiciones climáticas ya que o son poco eficientes o su coste es demasiado elevado para ser asumido. Necesitamos algo más, necesitamos una solución eficiente, fácilmente escalable y diseminable, persistente y barata.

Una alternativa podría ser la ingeniería ecológica, es decir, el diseño y construcción de ecosistemas, bien *de novo*, bien modificando los existentes, para que sean capaces de amortiguar los efectos derivados de la actividad humana. Estas modificaciones

son mucho más baratas, ya que los organismos tienden a duplicarse y colonizar los nichos disponibles. Nosotros proponemos ir un paso más allá y modificar estos ecosistemas con organismos capaces de incorporar nuevas funciones ecológicas, organismos sintéticos. Para ello, nos valdríamos de la biología sintética (ver monográfico 153). Nuestra hipótesis es que los organismos sintéticos podrían utilizarse de forma segura para mitigar las consecuencias del efecto antrópico sobre las variables climáticas. Estos sistemas estarían modificados para incorporar mecanismos de biorremediación, así como dependencias mutualistas que impidiesen la propagación descontrolada, y mecanismos de biocontención capaces de minimizar los procesos evolutivos no deseados. En este artículo solo se apuntan alguna de las ideas que se desarrollan con mayor profusión en los artículos ya publicados.

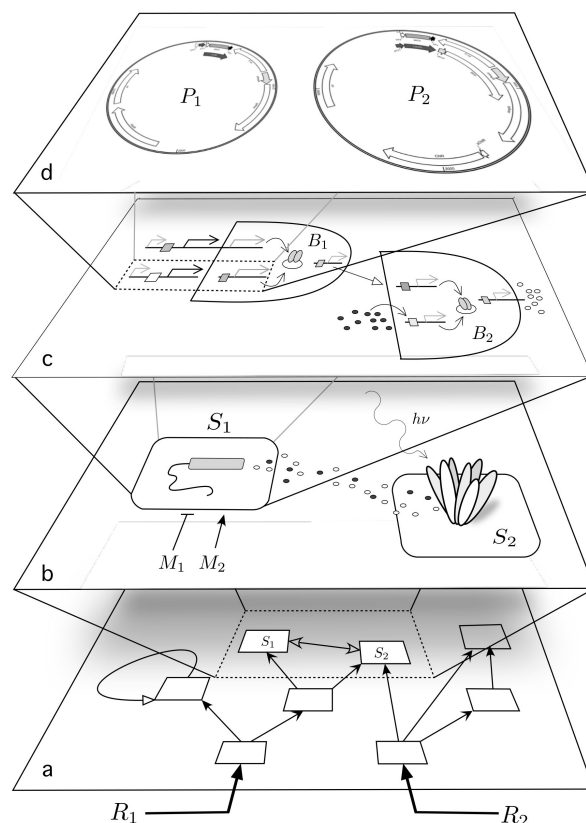


Figura 2. Aproximación multiescala en la que modificaremos las relaciones y funciones ecológicas a) modificando las interdependencias entre organismos (como estrategia de biocontención y computación distribuida) b). Planificando circuitos metabólicos capaces de extender las funciones metabólicas de los organismos c) mediante la modificación de sus genomas d). Figura tomada de [1].

Esta aproximación es un desafío intelectual en el que será necesario trabajar a múltiples escalas (Figura 2), a fin de no reiterar en los errores del pasado.

Es esencial, pues, entender y modelar las relaciones ecológicas preexistentes en el ecosistema y cómo la modificación de los organismos afectará a los equilibrios poblacionales y al posible devenir del mismo. Esto es esencial, pues los organismos modificados han de ser capaces de sobrevivir y poblar el ecosistema. De lo contrario, nuestra aproximación sería un fracaso comparable a las estrategias de la antigua Rusia de fertilizar los suelos de cultivos con microorganismos, los cuales eran incapaces de competir con los preexistentes y morían irremisiblemente. Afortunadamente, contamos con una tradición en teoría ecológica que se remonta a los años 20. Los modelos de dinámicas poblacionales y de evolución de comunidades ecológicas son ya grandes clásicos de la ecología matemática.

Debemos entender también la fisiología de los organismos y de qué modo podemos maximizar los fenómenos de cooperación como estrategia de biocontención de primer nivel. Así pues, nuestros organismos modificados estarán confinados y su propagación estará condicionada por la propagación de su huésped o cooperador, generando dinámicas poblacionales autorreguladas. A esta escala, trabajar con los organismos autóctonos de un determinado ecosistema, creando los derivados sintéticos desde estos, nos ayudará a minimizar las modificaciones ecológicas. De este modo, si los organismos pierden las modificaciones, los ecosistemas revierten a sus estados prístinos. En esta escala, contamos nuevamente con una larga tradición de modelos de competición, cooperación y cooperación con parasitismo, que nos facilitarán mucho el análisis de las dinámicas poblacionales. Por otro lado, el abaratamiento de los costes de secuenciación y los grandes avances en anotación de genomas y reconstrucción de redes metabólicas basadas en la anotación genómica, permitirán discernir las mejores estrategias de modificación genética que posibiliten establecer auxotrofías en ambos organismos que puedan ser compensadas por sus cooperadores.

Finalmente, existe un reto computacional y biotecnológico en el diseño de los circuitos metabólicos y genéticos. La optimización de una computación asociada a un circuito que minimice la carga metabólica del organismo pero que maximice el desarrollo de la función no es trivial. Otro reto importante es la selección de las señales de comunicación. En un circuito, cada impulso es transmitido por un único hilo de cobre, pero en biología, las señales no son tan fácilmente discernibles, encontrándonos con fenómenos de entrecruzamiento de las señales y efectos pleiotrópicos de las mismas. El último de los problemas a la hora de desarrollar los circuitos es poder disponer de los efectores (proteínas) apropiados.

Cuando nos planteamos modificar genéticamente

organismos y liberarlos a los ecosistemas, son también esenciales los mecanismos de contención de dispersión de las modificaciones y de la capacidad evolutiva, para lo cual la biología sintética ya ha desarrollado todo un conjunto de estrategias. La transferencia horizontal de genes ha marcado la evolución de los genomas. Este es un mecanismo que hemos de tener muy presente. En este punto, cabe plantearse dos alternativas; minimizarlo o maximizarlo. La minimización obedecería a las estrategias clásicas de biocontención (En este escenario, bastaría con un par de genes, uno letal y un inhibidor de esta letalidad. Los organismos tendrían integrados los antídotos en sus genomas, pero las funciones estarían codificadas en plásmidos o cromosomas artificiales, junto con el gen letal. De este modo, si algún otro organismo tomara el plásmido sin contar con el antídoto, moriría). Pero en los sistemas biológicos, sabemos que la degeneración (los casos en que los componentes estructurales, módulos funcionales o rutas metabólicas disímiles pueden llevar a cabo funciones similares bajo ciertas condiciones, pero realizan funciones distintas en otras condiciones) favorecen la estabilidad (robustez) de estos sistemas. De este modo, la propagación de las funciones sintéticas entre los organismos favorecería la robustez y perdurabilidad de la misma. Atendiendo a la capacidad evolutiva de los constructos, la biología sintética lleva años trabajando activamente en estos temas y se han encontrado ya algunas soluciones bastante elegantes como el diseño de proteínas sintéticas que empleen aminoácidos inexistentes en los organismos, o ARN mensajeros que solo son traducidos por un subconjunto de ribosomas debido a que los sitios de reconocimiento y anclaje han sido modificados en ambos casos.

Como prueba de concepto, nosotros proponemos tres posibles esquemas de intervención. Una estrategia basada en mutualismo, una basada en cooperación indirecta y la más clásica en biorremediación que es la de trabaja y muere.

Mutualismo sintético

En este caso, un organismo silvestre (WT), aislado del medio ambiente seleccionado, se transforma en un organismo sintético (SYN) mediante una dependencia mutua con un huésped (H). La dependencia mutua se puede implementar de muchas maneras diferentes. Un ejemplo natural a seguir es la relación de interdependencia de *Rhizobium* con plantas leguminosas (Figura 3c). En este sistema, *Rhizobium* fija el nitrógeno del aire en amonio, que actúa como un fertilizante natural para las plantas, mientras que la planta proporciona un nicho protector y nutritivo para el crecimiento bacteriano. El diseño de un sistema mutualista sintético va un paso más allá ya

que mediante la imposición de estas interdependencias podemos enriquecer las funciones ecológicas de dicho ecosistema, al tiempo que lo utilizamos como un mecanismo de contención ecológica, debido a que el fallo del sistema termina en la desaparición de las especies modificadas. En la Figura 3a mostramos el esquema asociado a este enfoque. Aquí el huésped y el organismo sintético (proviene de una cepa autóctona preexistente) se han convertido en cooperadores obligados. En este escenario, SYN tendrá que competir con su homólogo WT, ya presente en el ecosistema y más abundante aunque por otro lado el incremento del *fitness* como consecuencia de la cooperación convertirían a estos organismos en un hiperciclo. Al estar el crecimiento de las poblaciones favorecido por la presencia mutua, sus dinámicas poblacionales se acelerarían, favoreciendo la competitividad del consorcio y minimizando la aparición de parásitos que interferirían la viabilidad del hiperciclo.

Cooperación indirecta

Los fenómenos de cooperación pueden establecerse de múltiples modos. Un ejemplo de esto son los mecanismos de construcción de nicho. En ocasiones, un organismo es capaz de modificar el entorno de un modo tal que hace accesible ese entorno (nicho) a un segundo organismo. Esto es lo que se conoce como *cooperación indirecta* o *facilitación*. Si el segundo organismo favorece de algún modo la propagación del primero, volvemos a encontrar de nuevo un comportamiento hipercíclico. Uno de los posibles esquemas de cooperación indirecta podría ser un microorganismo productor de alguna sustancia higroscópica, capaz de retener mayores cantidades de agua en el suelo, agua que favorecería el crecimiento de plantas de climas semiáridos (Figura 3c). Las cianobacterias son unas magníficas candidatas ya que producen de modo natural polisacáridos extracelulares capaces de retener agua. La optimización de la producción de estas moléculas sobre alguna de las cepas silvestres preexistentes en las costras del suelo, incrementarían la retención de agua y con ello la productividad de suelos semiáridos.

¿Por qué las costras del suelo? Cuando paseamos por una zona árida o semiárida, solemos oír crujir las costras del suelo bajo nuestros pies y nunca nos paramos a pensar que están vivas. Las costras del suelo, están constituidas por consorcios de microorganismos, entre los cuales encontramos diferentes especies de cianobacterias (Figura 3d). En las zonas semiáridas, las costras cubren la mayor parte de la superficie de suelo y constituyen un regulador crucial de la respiración del suelo, la retención de agua y el reciclado de sus componentes. En consecuencia, las estrategias orientadas a la rehabilitación del suelo y la captura de carbono podrían centrarse en las estrategias de modificación genética de los organismos de las costras del suelo.

Los climas semiáridos juegan un importante papel en la fijación de CO₂. Es por esto que lo proponemos como un posible sistema a modificar. En hábitats áridos y semiáridos, las plantas suelen desarrollar interacciones locales que promueven los procesos de facilitación. De este modo, la presencia de plantas vecinas favorece el establecimiento de nuevas plantas, los microorganismos asociados y la preservación de un suelo sano. Al promover la cooperación indirecta estamos incrementando la facilitación y frenando los procesos de desertificación. Nuevamente, la transición de un sistema semiárido a un sistema desértico es abrupta. Una vez superada una retención mínima de agua o un pastoreo excesivo, el proceso de facilitación se verá debilitado y el sistema caerá irremisiblemente en una dinámica de desertificación.

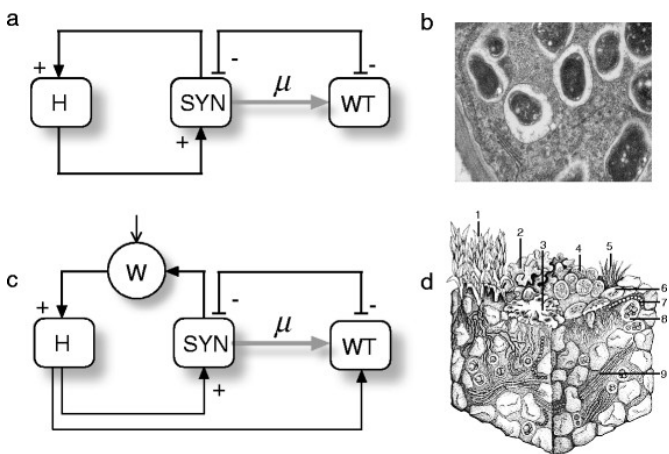


Figura 3. Diseños para la cooperación basados en la cooperación obligada entre organismos^[2]. Organismo sintético (SYN) modificado a partir de un organismo preexistente (WT) en el ecosistema a modificar para interactuar con un Hospedador (H). De modo que si la nueva función ecológica implementada se pierde (μ), el organismo retorna a su estado natural. Al ser SYN y WT los mismos organismos, estos competirán por los recursos. En (a) ambas especies dependen mutuamente entre sí. Del mismo modo que Leguminosas y micorrizas interactúan positivamente entre sí (b). Una estrategia alternativa es la facilitación, donde una de las especies modifica el nicho ecológico para favorecer la proliferación de ambos interactores (c). Este es, entre otros, el caso de las costras del suelo (d). Aquí indicamos (1) musgos, (2,3) líquenes, (4,5,7,9) cianobacterias, (6) y hongos (8) algas verdes.

La modificación de organismos para crear una dependencia mutualista entre ellos se ha realizado ya con éxito en varios casos. Entre estos, cabe destacar la modificación de un hongo patógeno de plantas para transformarlo en un simbiote de leguminosas, o el mutualismo sintético entre levaduras y algas.

Trabaja y muere

La modificación de un organismo para la realización de una tarea de terraformación, como el secuestro de CO₂ o la captación de metales pesados, puede estar acoplado a la degradación de un recurso dado, tales como las aguas residuales de las ciudades o la basura acumulada en los vertederos. Estos residuos derivados de la actividad antropogénica son considerados ahora recursos R sobre los cuales una comunidad de organismos SYS desarrollan una nueva función ecológica.

En la Figura 4a, se describe un posible esquema de intervención. Como en los casos anteriores, los organismos que pretendemos modificar habitan ya en el sistema. En este caso, sin embargo no existe ningún tipo de amplificación poblacional asociada a un comportamiento hipercíclico. De modo que los equilibrios poblacionales de SYN y de WT dependen exclusivamente de la disponibilidad de recurso R y de su capacidad procesamiento. A fin de otorgar una mayor capacidad invasiva a nuestros organismos, en estos ecosistemas altamente degradados, SYN debería poder procesar con mayor eficiencia R y en consecuencia crecer más rápidamente.

Como indicábamos al inicio, el 75 % de los ecosistemas terrestres ha sido alterado, de estos, un 15 % son ya ecosistemas altamente degradados en los cuales la incorporación de nuevas especies y nuevas funciones ecológicas no puede más que mejorar su situación. Vertederos, balsas de aguas residuales, explotaciones mineras, o las propias ciudades son ejemplos de estos sistemas altamente degradados. Los vórtices de plástico de nuestros océanos son otro ejemplo de este tipo de ecosistema altamente degradado sobre el que se podría intervenir. En los grandes giros anticiclónicos oceánicos (donde el movimiento geostrofico provoca la acumulación de agua superficial en el centro de los mismos) los plásticos flotantes se acumulan constituyendo lo que se han venido a llamar *islas de plástico*. Sabemos que los plásticos oceánicos están colonizados por muchas especies diferentes. Algunas de las cuales han empezado a emplear estos plásticos como fuente de carbono. Algunos autores hablan ya de la «plastiesfera» y de los «plastívoros». Esta plastisfera y estos plastívoros constituyen un nuevo ecosistema sobre el que las acciones terraformadoras podrían operar favoreciendo el establecimiento de biofilms de organismos capaces de expresar las enzimas recientemente encontradas en *Ideonella sakaiensis* y que permite a éstas emplear el plástico como fuente de carbono, incrementando con esto la tasa de decaimiento de los mismos en los océanos (Figura 4).

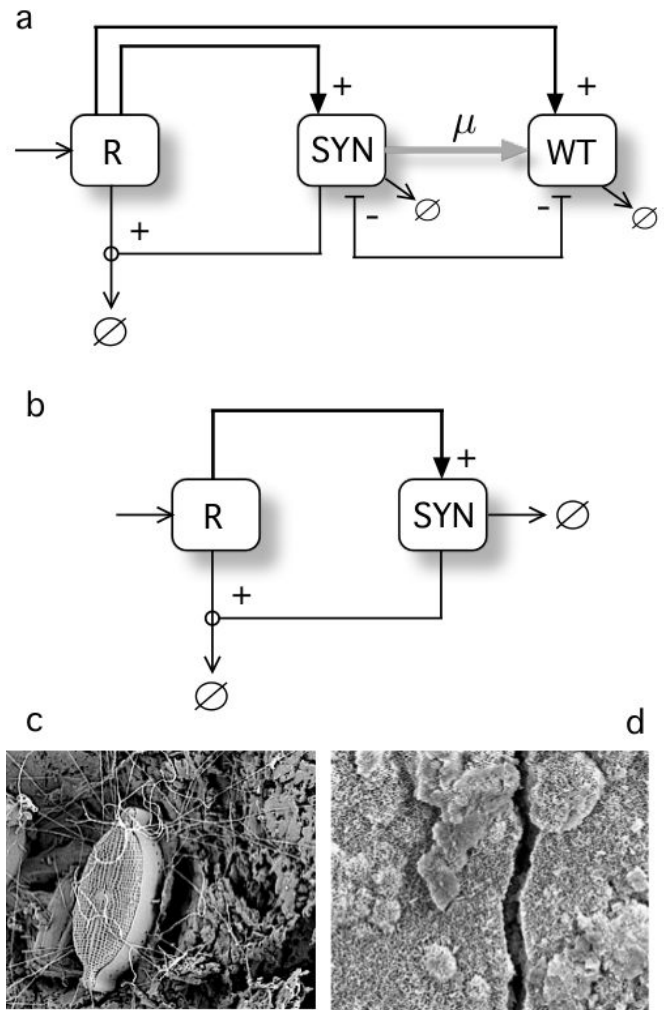


Figura 4. Esquema de terraformación basado en la lógica de *trabaja y muere*^[2]. Aquí un sustrato R dado se genera a una velocidad dada y proporciona sustrato físico para la población sintética y la población salvaje. El esquema en (a) se basa en la modificación de unas especies existentes siguiendo los mismos criterios que se describen en la Figura 3, mientras que en (b) La especie sintética se ha modificado para unirse activamente al recurso R. En ambos casos, la especie modificada podrá degradar el recurso R quedando limitada la población de SYN a la disponibilidad de R. Posibles candidatos son: los desechos plásticos de los océanos, sobre los que se sabe que muchas especies pueden crear bio-películas (c) o grietas de cemento (d).

Consideremos ahora nuestras ciudades; tienen sus propios «sistemas digestivos» a través de los cuales viajan nuestros desechos. Nuestros sistemas de alcantarillado son «intestinos urbanos» recorridos diariamente por toneladas de materia orgánica que podría ser empleada para alimentar a un microbioma de las alcantarillas completamente sintético. El microbioma ya existente en las alcantarillas es muy rico y diverso y podría aportarnos todo un nuevo conjunto de metabolismos y funciones ecológicas que explotar. Este microbioma, podría fijar diferentes gases de efecto invernadero, podría descomponer a su paso los aceites o captar los fosfatos. Por otro lado, un

escenario basado en el alcantarillado es especialmente útil para nosotros, ya que al igual que ocurre con nuestro microbioma, el microbioma de las cloacas se libera finalmente una vez que alcanzan el mar abierto y sus nichos se ven afectados por cambios en la osmolaridad, pH o la disponibilidad de recursos. Esto es en sí mismo un mecanismo de biocontención pues los organismos modificados verían tremendamente reducido su capacidad competitiva una vez alcanzado el mar.

Conclusiones

Si algo hemos aprendido en nuestro devenir es que las modificaciones de los ecosistemas han de hacerse con sumo cuidado. Sería descabellado intervenir de este modo en los ecosistemas sin antes haber probado profusamente cada una de las posibilidades. Queremos poner a prueba nuestra hipótesis utilizando tres enfoques diferentes, *in silico* (aplicación de modelos computacionales), a microescala (prueba de la estabilidad evolutiva de las funciones incorporadas en los organismos SYN y de las dinámicas poblacionales de estos organismos en biorreactores) y a mesoescala, liberando SYN en ecosistemas completos pero en condiciones controladas y confinadas. Los modelos computacionales nos darán una intuición sobre cómo se relacionan las variables y dónde tenemos que concentrarnos para conseguir el máximo impacto. Las pruebas a micro escala tienen que involucrar experimentos relacionados con el análisis de la eficiencia de las funciones ecológicas implementadas, evaluación del fitness ecológico de organismos modificados y análisis de la estabilidad a largo plazo del sistema. La estabilidad de la función ecológica incorporada y el fitness de los organismos SYN se puede probar en el crecimiento a largo plazo en biorreactores, con poblaciones individuales o mixtas. Por último, en los experimentos a mesoescala, que reproducen de un modo próximo a los entornos naturales los ecosistemas donde se actuará, se deben de reproducir todas estas pruebas y analizar a largo plazo la viabilidad ecológica del sistema y la efectividad de los organismos antes de la liberación de organismos SYN. Todo esto constituye un vasto trabajo que desarrollar, pero ya se ha avanzado mucho en estrategias destinadas a la biorremediación puntual de contaminantes (ver los trabajos de Victor de Lorenzo en *Pseudomonas putida*).

Las estrategias de terraformación que se han presentado constituyen un marco teórico mediante el cual presentar una alternativa a las estrategias existentes. En este marco, la biología sintética, la ecología y la climatología han de trabajar en común para el desarrollo de un conjunto de sistemas de mitigación

del efecto antrópico sobre los ecosistemas y el clima. La principal ventaja de esta aproximación, es la capacidad autorreplicativa de los organismos vivos, y en consecuencia, el reducido coste de la escalabilidad del método. Esto es así porque los organismos vivos, somos los únicos capaces de modificar los flujos de energía y materia a través de los ecosistemas mediante procesos de facilitación y de construcción de nichos. Esto, junto con la capacidad invasiva de los seres vivos, convierte a esta aproximación en una alternativa factible y razonable.

La principal objeción que esta aproximación puede tener es lo que se conoce como el «Efecto Parque Jurásico». Este efecto se define como la aparición de características no deseadas como consecuencia de la evolución de los organismos implantados que les permita escapar de los mecanismos de biocontención. Esta objeción es razonable si atendemos a la capacidad manifiesta de los microorganismos de evolucionar. Sin embargo, la historia nos refleja múltiples sucesos de dispersión de microorganismos sin consecuencias algunas. Como comentábamos anteriormente, el mejor ejemplo fueron las estrategias de fertilización de las tierras de cultivo mediante cócteles de microorganismos desarrolladas por la antigua Unión Soviética. El fracaso de estas acciones obedece a la falta de conocimiento sobre las relaciones ecológicas de la época.

Nuestra aproximación se sustenta en la modificación de organismos preexistentes en los ecosistemas, enriqueciendo estos mediante fenómenos de mutualismo y cooperación indirecta. En todos los casos la interacción sinérgica entre el diseño y el contexto (organismos y entorno) favorece el despliegue de la complejidad ecológica y el acceso a nuevos estados de equilibrio. Equilibrios que en gran medida ya han sido transformados por nuestra actividad. Lejos de lo que podíamos esperar, Los nuevos ecosistemas podrían ser más diversos, robustos y eficientes atendiendo al reciclado de nutrientes, las interacciones de las cadenas tróficas y otros determinantes del equilibrio ecológico. Es el momento de decidir qué queremos y cuál es nuestro papel en el futuro de la naturaleza. Si queremos que los seres humanos sean parte de la biosfera, tenemos que prever el futuro impacto del cambio climático en nuestro planeta. Una respuesta lenta puede poner en peligro nuestra supervivencia. Nosotros pensamos que la biología sintética puede desempeñar un papel importante, junto con el resto de las estrategias planteadas, para modificar las tendencias en curso. Eso significa un rediseño de la naturaleza no exento de riesgos, pero tal vez la única estrategia viable para salir con seguridad del Antropoceno.