

Gobernanza de los riesgos de tecnologías emergentes: el caso de la biología sintética en Latinoamérica*

Risk governance of emerging technologies: the case of synthetic biology in Latin America

CÉSAR CISTERNAS IRARRÁZABAL

Universidad de La Frontera, Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile, Casilla 54-D,
Código Postal: 4811230.

cesar.cisternas@ufrontera.cl

<https://orcid.org/0000-0002-4510-4239>

ARTURO VALLEJOS-ROMERO

Universidad de La Frontera, Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile, Casilla 54-D,
Código Postal: 4811230.

arturo.vallejos@ufrontera.cl

<https://orcid.org/0000-0002-0393-7275>

MINERVA CORDOVÉS-SÁNCHEZ

Universidad de La Frontera, Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile, Casilla 54-D,
Código Postal: 4811230.

minerva.cordoves@ufrontera.cl

<https://orcid.org/0000-0002-0513-7837>

FELIPE SÁEZ-ARDURA

Universidad de La Frontera, Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile, Casilla 54-D,
Código Postal: 4811230.

felipe.saez @ufrontera.cl

<http://orcid.org/0000-0001-9472-5552>

Recibido/Received:22/03/2024. Aceptado/Accepted: 26/11/2024.

Cómo citar/How to cite: Cisternas Irarrázabal, C., Vallejos-Romero, A., Cordoves-Sanchez, M., y Sáez-Ardura, F. (2025). Gobernanza de los riesgos de tecnologías emergentes: el caso de la biología sintética en Latinoamérica. *Sociología y Tecnociencia*, 15 (1), 74-99. DOI: <https://doi.org/10.24197/st.1.2025.74-99>.

* Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo [Fondecyt 1210714] y la Universidad de La Frontera [DIUFRO DI23-0067].

Artículo de acceso abierto distribuido bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional \(CC-BY 4.0\)](#). / Open access article under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC-BY 4.0\)](#).

Resumen: En los últimos años, ha resurgido con fuerza el debate sobre la gobernanza y regulación de tecnologías emergentes, especialmente en relación con la inteligencia artificial, vehículos sin conductor y desarrollos del campo de la biología aplicada. En este marco, el presente trabajo se centra en la biología sintética, analizando, desde la perspectiva de la teoría de los sistemas sociales de Niklas Luhmann, los desafíos que se presentan en América Latina para su gobernanza. Se concluye que la realidad de América Latina presenta obstáculos adicionales para la gobernanza de la biología sintética, entre los que destacan, la consolidación del campo científico, las condiciones del sistema político y la dificultad para la coordinación con organizaciones de la sociedad civil.

Palabras clave: biología sintética; gobernanza; tecnologías emergentes; teoría de sistemas sociales; América Latina.

Abstract: In recent years, the debate on the governance and regulation of emerging technologies has resurfaced strongly, especially in relation to artificial intelligence, driverless vehicles, and developments in the field of applied biology. Within this framework, this paper focuses on synthetic biology, analysing, from the perspective of Niklas Luhmann's social systems theory, the challenges for its governance in Latin America. It is concluded that the reality of Latin America presents additional obstacles for the governance of synthetic biology, among which the consolidation of the scientific field, the conditions of the political system and the difficulty in coordinating with civil society organizations stand out.

Keywords: synthetic biology; governance; emerging technologies; social systems theory; Latin America.

1. INTRODUCCIÓN

El presente ensayo analiza, desde la perspectiva de la teoría de sistemas sociales de Niklas Luhmann, los desafíos que la gobernanza de tecnologías emergentes potencialmente peligrosas enfrenta en América Latina. Para este ejercicio se toma como caso de estudio la biología sintética. Se argumenta que la región presenta obstáculos particulares en tres ámbitos: consolidación del campo científico, condiciones del sistema político y la dificultad para la coordinación con organizaciones de la sociedad civil.

La biología sintética es un campo de estudio interdisciplinario que emerge de la conjunción de la biología molecular, la biotecnología, la química y la informática y se enfoca en la modificación de partes y sistemas biológicos, pretendiendo, en último término, lograr crearlos a partir de materia no viviente (Keshava et al., 2018). La aplicación tecnológica de sus avances puede contribuir significativamente en ámbitos como la generación de energías, el desarrollo de fármacos y tratamientos médicos, la biorremediación y la producción alimentaria.

Sin embargo, la incertidumbre asociada a los posibles impactos sociales y ambientales y el uso malicioso lleva a que, tal como sucede con otras tecnologías de

vanguardia, sus riesgos no constituyan una mera percepción derivada de una evaluación externa, sino un pilar central del propio desarrollo de las posibilidades de investigación e innovación en la materia (Luhmann, 2006b). En consecuencia, la biología sintética ha enfrentado desde su origen debates en relación con sus alcances éticos, implicaciones legales e impactos medioambientales (Breitling et al., 2015; Lai et al., 2019; Mandel y Marchant, 2014; Rager-Zisman, 2012, Vallejos-Romero et al., 2021; Wolfe et al., 2016). Debido a esto, se ha generado cierto consenso respecto a la necesidad de avanzar en marcos de gobernanza que permitan aprovechar y explotar al máximo los beneficios del avance en este campo del conocimiento, a la vez que se contienen sus riesgos (Douglas y Stermerding, 2014; Trump, 2017; Siewert et al., 2023).

El enfoque de la gobernanza busca superar las limitaciones que tiene un sistema organizacional –orientado a la toma de decisiones (Luhmann, 2010)– como el Estado para lidiar con problemas complejos. Esto cobra sentido al considerar que los problemas multidimensionales y colectivos, como los riesgos socioambientales, no pueden ser abordados en su total complejidad desde un único sistema organizacional o social –sea este, por ejemplo, la política, la economía, la ciencia, etc.– (Luhmann, 2006b). En efecto, debido a la orientación altamente especializada de los sistemas parciales de la sociedad, estos pueden procesar la información de su entorno solo mediante sus propios códigos operacionales (poder, valor económico, veracidad del conocimiento, etc.), lo cual los lleva a excluir todas las dimensiones del problema que no se vinculan directamente con su interés operacional (Luhmann, 2006b; 2020).

Para el caso particular de asuntos como las consecuencias no deseadas del desarrollo de las tecnologías de vanguardia, entonces, el paradigma de la gobernanza ofrece dos ventajas cruciales. Por una parte, permite aprovechar la capacidad de observación y procesamiento de complejidad de varios sistemas organizacionales para obtener un mejor diagnóstico y enfrentar de mejor manera una cuestión pública. Y, por otra, al establecer una coordinación entre organizaciones asociadas a distintos sistemas sociales, recurre a prestaciones de otros sistemas, trascendiendo la esfera del sistema político en busca de decisiones mejores y que cuenten con un mayor nivel de legitimidad.

En América Latina, el campo de la biología sintética ha visto posicionarse algunos centros especializados y grupos de investigación, destacando los casos de Brasil, México, Argentina y Chile, países que concentran aproximadamente el 95% de los trabajos académicos en el área dentro del subcontinente. Distintos análisis coinciden en señalar el enorme potencial que tiene la región para la investigación e innovación en biología sintética (CEPAL, FAO y IICA, 2017; Federici et al., 2013; Gomez-Hinostroza et al., 2023; Inter-American Development Bank; 2017), por lo que este campo podría proveer oportunidades para la agregación de valor y la diversificación de actividades económicas. En consecuencia, parece un momento

adecuado para problematizar la gobernanza de estas tecnologías y los desafíos particulares que una región periférica presenta para esta.

Ahora bien, la región ha avanzado escasamente en la implementación de esquemas de gobernanza de asuntos de interés público (Moreno, 2021). Además, sus particulares características podrían dificultar la adopción de modelos de gobernanza diseñados en otras zonas geográficas. Estas condiciones se vuelven particularmente relevantes en el ámbito de las tecnologías emergentes, pues las estrategias de gobernanza de este tipo de tecnologías suelen pensarse desde el mundo anglosajón u otros países desarrollados.

El desarrollo del trabajo se estructura en cuatro secciones. La primera de ellas expone el modo en el que la teoría de sistemas sociales comprende la sociedad y el sistema científico. Posteriormente, se revisa el concepto de gobernanza y los modelos propuestos para la gobernanza de la biología sintética. La tercera sección reseña la discusión sobre los flancos abiertos para la gobernanza de la biología sintética a nivel global. La cuarta sección presenta los desafíos que la realidad latinoamericana supone para la gobernanza de la biología sintética. Finalmente, se exponen las conclusiones del trabajo.

2. LA GOBERNANZA DE CAMPOS CIENTÍFICOS DE ALTA INCERTIDUMBRE: UNA PERSPECTIVA SISTÉMICA

La noción de gobernanza aparece cada vez con más frecuencia en el campo de las tecnologías emergentes. Sin embargo, existen distintas corrientes de pensamiento sobre el concepto que, muchas veces, son contradictorias o apuntan a problemas radicalmente distintos (Peters y Filgueiras, 2002). En este sentido, van Kersbergen y van Waarden (2004) notaron, ya a comienzos del siglo XXI, que en distintos campos y temáticas de investigación la idea de gobernanza está asociada a múltiples significados, tales como cooperación internacional para la fijación de una estructura normativa supranacional, gobernanza sin gobierno, mejoras de las prácticas administrativas del estado y las empresas, o redes descentralizadas de gobernanza.

Pero, originalmente, la noción de gobernanza emerge como intento de ampliar la reflexión sobre el gobierno de asuntos de interés público más allá de los límites de la estatidad. Así, tal como lo sugiere Rhodes (1996), la gobernanza implica una asociatividad de la sociedad civil mediante redes de organizaciones no centradas en el Estado, que se extienden a distintos ámbitos sociales para abordar un problema colectivo.

En términos de la teoría de sistemas, esto implica que la operación propia del sistema político, es decir, la toma de decisiones colectivamente vinculantes (Luhmann, 2020), deja de estar limitada a la esfera del Estado y, por lo tanto, en el proceso se aprovechan las prestaciones de otros sistemas sociales y el conocimiento de las organizaciones no estatales. Estas últimas, desde la aproximación sistémica, suponen un pilar clave para todo esquema de gobernanza, puesto que son sistemas

especializados en la toma de decisiones que procesan enormes cantidades de inputs informacionales de su entorno, por lo que cuentan con estructuras y conocimientos adecuados para enfrentar la incertidumbre y complejidad de tal entorno (Luhmann, 2006a, 2010).

Debido a su énfasis en la vinculación de múltiples instancias, el paradigma de la gobernanza permite superar el viejo dogma que concebía un mundo dividido entre la esfera pública y la privada. Invita, así, a pensar en una realidad policéntrica con actores capaces de gobernar múltiples sitios a través de una variedad de formas de poder y guiados, en gran medida, por el interés propio (Burris et al., 2008).

En base a estos lineamientos teóricos, es posible sostener que cualquier régimen de gobernanza presupone la existencia de unas determinadas condiciones que permitan la viabilidad de su diseño, implementación y operación. En primer lugar, esta clase de estructuras requiere un sistema político abierto a la descentralización del poder y a la participación ciudadana. Asimismo, se vuelve necesario contar con actores no estatales sólidos que puedan proyectar su existencia en el mediano y largo plazo. Y, finalmente, es preciso que las organizaciones de la sociedad civil tengan las capacidades necesarias, en términos de estructura interna y representatividad, para negociar con el estado a nivel central y local. En consecuencia, es posible afirmar que un análisis de la gobernanza de la biología sintética debe tomar en cuenta las condiciones de la democracia o régimen político existente, el nivel de consolidación de los distintos actores no gubernamentales implicados y la factibilidad de generar coordinación con distintas organizaciones de la sociedad civil.

En el caso de la biología sintética, la problematización de sus riesgos y las estrategias para contenerlos se realizó, primero, desde el paradigma ELSI –acrónimo en inglés para implicaciones éticas, legales y sociales–, el cual ha recibido objeciones por excluir del análisis las dinámicas y prácticas del campo científico en las que se enmarca el desarrollo tecnológico (Nordmann y Rip, 2009) y limitarse a ser un predictor de potenciales consecuencias negativas (Balmer et al., 2015). Posteriormente, se transitó a una aproximación desde la evaluación y gestión de riesgos, construyéndose propuestas para estimar cuantitativamente los riesgos asociados a un desarrollo tecnológico (Rycroft et al, 2019) y determinar qué regulaciones resultan pertinentes en cada caso (Finkel, 2020).

Las limitaciones de las aproximaciones ELSI y de evaluación de riesgos ha llevado a que se genere una reflexión más profunda sobre el modo de enfrentar las consecuencias no deseadas y potenciales de la biología sintética desde la vertiente de la gobernanza de riesgos. Distintos modelos de gobernanza se han propuesto para abordar este problema. Una de ellas es la gobernanza adaptativa, perspectiva que sugiere aprovechar el conocimiento de los actores y entidades locales y la flexibilidad de las redes que trascienden la institucionalidad burocrática estatal para abordar la incerteza y rápidos cambios que definen a los problemas socioambientales,

resaltando el rol clave del capital social, el liderazgo y la confianza (Folke et al., 2005).

Este acercamiento reconoce que las estructuras burocráticas nacionales y los sistemas sociales principales (ciencia, economía, política y derecho) tienen serias dificultades para abordar por sí solos los desafíos sociales contemporáneos, lo que resulta especialmente patente en el caso de los problemas ecológicos (Luhmann, 2006b). Sugiere, así, propiciar la coordinación de organizaciones de distintos sistemas sociales y niveles geográficos con el fin de aprovechar el conocimiento – vale decir, las estructuras de observación–, de los sistemas organizacionales locales para abordar de manera más flexible y eficiente los desafíos emergentes asociados a determinado problema.

Hace una década, dos importantes reportes publicados por centros especializados del mundo anglosajón sugirieron aplicar esquemas de gobernanza adaptativa a la biología sintética. Para esto estipularon como un lineamiento basal el avanzar hacia una gestión de los riesgos de la biología sintética desde esquemas flexibles y que pudieran responder adecuadamente a tres ejes: (1) la variabilidad de las oportunidades de innovación, estimulando el aprovechamiento de estas; (2) la limitación de los riesgos para los humanos y el medioambiente; y (3) conciliar los intereses y valores de los grupos de interés relevantes (International Risk Governance Council, 2010; Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues, 2010).

Unos años más tarde, Trump (2017) presenta un elaborado esquema de gobernanza adaptativa: el modelo TAPIC. Dicho modelo, aboga por una coordinación en red de múltiples agentes asociados a distintos sectores sociales, teniendo como principios orientadores fundamentales la transparencia, rendición de cuentas (accountability), participación, integridad y capacidad –elementos de los cuales proviene el acrónimo TAPIC–. Dos aristas que requieren especial atención para una gobernanza efectiva desde este enfoque guardan relación con la revisión de: (1) los puntos en que la falta de datos impide una correcta evaluación de riesgos, y (2) las limitaciones de los arreglos institucionales existentes, que prescinden de la participación de actores asociados a la industria, la academia y ONGs, para regular el proceso de desarrollo de la biología sintética (Trump, 2017).

Mourby et al. (2022), en un enfoque que denominan gobernanza societal adaptativa, proponen la creación de una red global sustentada en una plataforma digital de acceso abierto que actúe al estilo de un observatorio. Su actividad se orientaría a constituirse en un espacio de análisis de la evidencia disponible y de las brechas de conocimiento existentes, quedando su trabajo como un insumo a disposición de legisladores y reguladores a nivel mundial.

No obstante, en una reflexión crítica sobre el avance hacia la gobernanza adaptativa de la biología sintética, Tait (2012) estipula que los procesos de toma de decisiones bajo este esquema de gobernanza corren el riesgo de obviar la evidencia científica disponible. En este sentido, uno de los grandes desafíos para la gobernanza adaptativa es idear estrategias legítimas que, reconociendo el valor de las posturas

valórico-ideológicas de las ONGs, también consideren la evidencia científica (Tait, 2012).

De manera reciente, ha crecido el interés en el enfoque de la gobernanza anticipatoria. Este modelo propone generar “un proceso de toma de decisiones sustentable basado en consensos sobre un futuro o visión deseable mediante la participación de varios grupos de interés, incluyendo al gobierno, el mercado, el público y los académicos” (Heo y Seo, 2021, p. 2).

En este sentido, este paradigma de gobernanza –al igual que el de gobernanza adaptativa– tiene presente que los sistemas sociales de manera individual son incapaces de abordar la cuestión ecológica, rescatando el valor que tienen los conocimientos de los sistemas organizacionales locales para afrontar de modo más eficaz los desafíos emergentes. Pero, además, los supuestos implícitos en este paradigma de gobernanza coinciden con el diagnóstico de la teoría de sistemas respecto a que el modelo de desarrollo ha incrementado exponencialmente la necesidad de la sociedad de decidir sobre el futuro (Luhmann, 2006b).

En consecuencia, la gobernanza anticipatoria plantea la necesidad de negociar expectativas sobre el futuro mediante el acoplamiento o la coordinación de organizaciones pertenecientes a distintos sistemas sociales.

Varios de los trabajos recientes sobre gobernanza de la biología sintética se enmarcan en este modelo. Así, por ejemplo, Ribeiro y Shapira (2019), analizando el caso del mentol biosintético, recalcan que para el desarrollo de estrategias de gobernanza es relevante considerar aspectos como las particularidades geográficas de los arreglos sociotécnicos, las suposiciones sobre la sustentabilidad ambiental, los modelos de producción y el modo en que el público le da sentido a la incertidumbre propia de las nuevas tecnologías. Mientras que Cummings y Kuzma (2017) construyen un método para recoger la percepción de grupos de interés y expertos sobre riesgos y beneficios de la biología sintética, describiendo como esta herramienta puede ser empleada para la priorización de líneas de investigación, la recolección de información y el diálogo en contextos de capacidad limitada de gobernanza.

3. FLANCOS ABIERTOS PARA LA GOBERNANZA DE LA BIOLOGÍA SINTÉTICA

A lo largo de más de una década, la reflexión sobre la gobernanza de la biología sintética en los países desarrollados ha resaltado la existencia de un conjunto de desafíos abiertos para su implementación.

En uno de los primeros trabajos que aborda el tópico, Mukunda et al. (2009) argumentan que la incertidumbre respecto al desarrollo futuro de la biología sintética y la falta de debate público sobre ella, obligarían a actualizar y corregir periódicamente cualquier estrategia de gobernanza. En una línea similar, Gorman (2012) resalta la importancia de la gestión adaptativa y la anticipación en las estrategias de gobernanza, sugiriendo el uso de herramientas de simulación y

modelación en este tipo de arreglos de gobernanza. Debido a la amplia gama de posibles aplicaciones y sus ambiciosas metas por alcanzar, este continúa siendo, en la actualidad, uno de los desafíos fundamentales para su gobernanza (Trump et al., 2020).

Un segundo desafío para la gobernanza se vincula con los regímenes de propiedad que han de aplicarse a los desarrollos tecnológicos del campo. A este respecto, Hilgartner (2012) expone las tensiones entre el modelo tradicional de patentación y los modelos alternativos de biología abierta como el *copyleft*, argumentando que el dominio abierto incentivará de mejor manera la innovación y el empoderamiento ciudadano.

En una arista tangencialmente relacionada, algunos trabajos han problematizado el modo en que el acceso al campo y la práctica misma de investigación en biología sintética deben ser gobernados y regulados, teniendo en cuenta especialmente potenciales amenazas terroristas y a la bioseguridad. En este punto existen visiones contrapuestas. Así, existen partidarios de ejercer una regulación restrictiva y una vigilancia muy cercana en un esquema dotado de las debidas herramientas legislativas y regulatorias que permitan restringir y supervisar a quienes pueden investigar en el área (Li et al., 2021). Mientras que otros abogan por sistemas híbridos que combinen medidas de regulación gubernamental y estrategias de autogobernanza, argumentando que dichas estrategias son claves para dotar a los sistemas de gobernanza de la flexibilidad y capacidad de adaptación necesarios para gobernar una tecnología emergente (Akpoviri et al., 2021).

Asimismo, al considerar los casos de otras tecnologías de ingeniería genética, algunos expertos han alertado de una potencial oposición pública a esta tecnología que sobredimensione sus riesgos e impida su desarrollo y la explotación de sus beneficios (Tait, 2009). No obstante, ante la constatación de que en ciertos entornos de investigación e innovación predomina entre los biólogos sintéticos un temor al rechazo del público hacia la biología sintética, se ha recalcado que, sin la participación de pública y el debate abierto en torno a las controversias, los esquemas de gobernanza no serán eficaces (Marris, 2015).

A lo largo de los últimos años, distintos trabajos han coincidido en apuntar que las políticas de innovación en biología sintética deben evitar una aproximación exclusivamente técnica y avanzar hacia enfoques más transparentes, participativos y deliberativos (Delborne et al., 2020; Meyer, 2013; Pauwels, 2012; Siewert et al., 2023; Sinden, 2018; Stermerding et al., 2019; Stirling et al., 2018; Tait y Wield, 2021; Trump et al., 2018).

Ahora bien, la apertura del camino a la deliberación y participación del público no experto en la toma de decisiones respecto al impulso y regulación de la biología sintética demanda atender una serie de puntos adicionales. En este sentido, se genera la necesidad de equilibrar, por una parte, el reconocimiento del valor de las posturas valórico-ideológicas de las ONGs, y por otra, la consideración de la evidencia científica disponible (Tait, 2012).

En segundo lugar, esta aproximación refuerza la necesidad de evaluar de los factores que determinan la aceptación pública de las nuevas aplicaciones tecnológicas (Kuzma y Tanji, 2010; Mandel y Marchant, 2014; Sinden, 2018; Hagen, 2016; Oliver, 2018). Además, empuja a una reflexión constante respecto a las limitaciones de los arreglos institucionales existentes, que prescinden de la participación de actores asociados a la industria, la academia y ONGs, para regular el proceso de desarrollo de la biología sintética (Trump, 2017).

En cuarto término, la participación pública en el gobierno de la biología sintética supone encontrar formas para eliminar las barreras que puede representar el lenguaje altamente técnico, característico de la disciplina, para la comprensión adecuada de los desarrollos tecnológicos por parte del público general (Stirling et al., 2018). Y, adicionalmente, requiere un fuerte financiamiento debido al alto costo asociado a la organización de instancias de participación y al logro del compromiso comunitario (Stirling et al., 2018).

Finalmente, se ha remarcado que la gobernanza de la biología sintética demanda, además, problematizar cuestiones vinculadas a los beneficios que reciben las comunidades situadas en los contextos en los que se desarrolla la investigación (Thizy et al., 2020).

4. DESAFÍOS PARA LA GOBERNANZA DE LA BIOLOGÍA SINTÉTICA EN AMÉRICA LATINA

Aunque los sistemas sociales diferenciados son globales, estos no surgen mediante la homogeneización total de las diversas regiones del mundo. Por el contrario, como lo indica Stichweh (2007), tales sistemas expanden su presencia mediante la superposición de sus estructuras sobre aquellas existentes desde la premodernidad en otras zonas geográficas, dando origen a estructuras propias o *eigenestructuras*, es decir, entramados de estructuras modernas y premodernas.

En consecuencia, las regiones periféricas, como América Latina, presentan condiciones particulares que pueden, por una parte, acentuar los desafíos de la gobernanza de la biología sintética que se han identificado en el mundo desarrollado (Ely et al., 2014; Stirling et al., 2018), y por otra, crear unos nuevos.

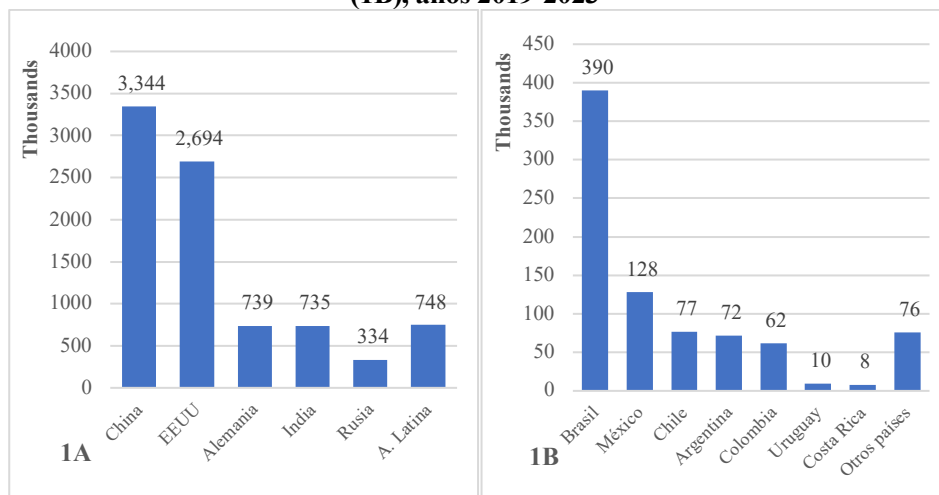
Desde una aproximación que se hace cargo de las particularidades de las estructuras y el esquema de diferenciación de la sociedad latinoamericana, a continuación, se realiza un análisis de las condiciones de operación que debe enfrentar la gobernanza de la biología sintética en la región. Este análisis se realiza en función de las tres dimensiones identificadas anteriormente como relevantes para este fin, a saber: el nivel de consolidación del principal actor no gubernamental implicado: el campo científico local, las condiciones de la democracia o régimen político existente y la factibilidad de generar coordinación con distintas organizaciones de la sociedad civil.

4.1. Consolidación de los actores no gubernamentales implicados: sistema científico

Un primer aspecto a tener en cuenta para la gobernanza de las tecnologías asociadas a la biología sintética en este subcontinente es la reciente emergencia del campo local, la cual se da, además, en el marco de un rol secundario en las redes científicas y económicas globales.

América Latina presenta rasgos heterogéneos en cuanto al tamaño, consolidación y orientación de sus sistemas científicos, siendo Brasil, México, Argentina, Chile, Colombia, Uruguay y Costa Rica los países líderes en la materia, según la magnitud de la producción científica, investigadores e inversión en relación con su población. En la Figura 1 se puede ver, por una parte, una comparativa de la producción científica latinoamericana y la de algunas de las principales potencias científicas mundiales (1A) y, por otro, la cantidad de publicaciones de los países con sistemas científicos más desarrollados de la región (1B).

Figura 1. Publicaciones indexadas en Web of Science afiliadas a América Latina, en comparación con algunas potencias científicas (1A) y según país (1B), años 2019-2023*



*Se consideran solo artículos, reviews y proceeding papers.

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de Web of Science.

A lo largo de la última década, la producción científica de la región se ha incrementado considerablemente, aunque el impacto de estas publicaciones en sus campos permanece como un punto débil (UNESCO, 2021). Un factor crucial en el crecimiento de la ciencia latinoamericana ha sido la consolidación de vínculos internacionales, reflejada en la alta cantidad de publicaciones con colaboración

internacional (CEPAL, 2022), lo que les ha permitido a sus comunidades científicas insertarse en el sistema científico global. Aunque esta inserción se ha dado en el marco de un desarrollo tardío de las capacidades científicas, siguiendo agendas de investigación foráneas, financiamiento insuficiente y una dependencia teórica y técnica de las potencias científicas (Kreimer, 2023).

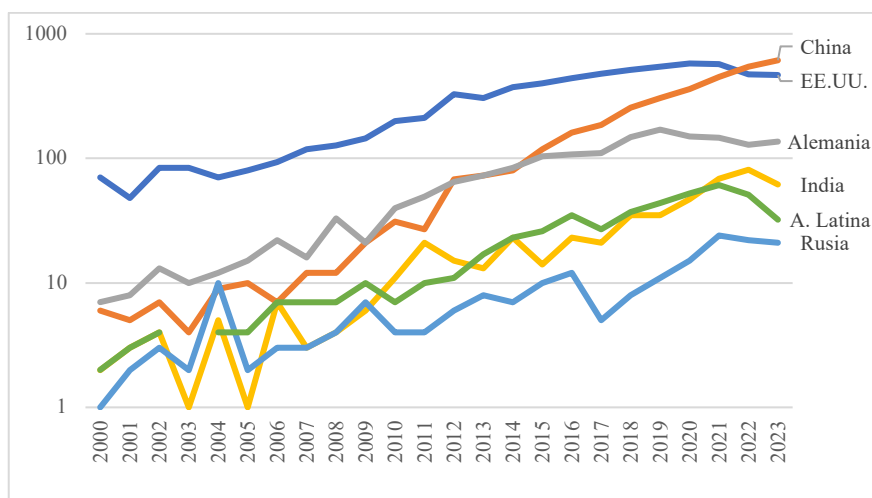
Pese a todos los desafíos pendientes, durante los últimos años no se observan modificaciones mayores en las estrategias de gobernanza de los sistemas nacionales de innovación de la región, al tiempo que, en muchos países, las instituciones creadas con la misión de consolidar estos sistemas no han podido lograr su cometido en medio de la fuerte inestabilidad política y la reducción del financiamiento (UNESCO, 2021).

Como se ha señalado anteriormente, el sistema científico tiene un carácter global, pero en el subcontinente sus estructuras se han insertado en un entorno condicionado por la operación de los sistemas económico y político. Es decir, bajo la orientación productiva de la región, la investigación científica y la innovación tecnológica no constituyen actividades rentables, al tiempo que el sistema político no ha seleccionado como prioritario cambiar esta realidad.

La región cuenta con capacidades instaladas interesantes en investigación en el ámbito de las ciencias de la vida. Sin embargo, a pesar de que diversos análisis de oportunidades en innovación tecnológica han recalcado el potencial de América Latina en biología sintética, el campo sigue subexplotado (CEPAL, FAO y IICA, 2017; Federici et al., 2013; Gomez-Hinostroza et al., 2023; Inter-American Development Bank; 2017).

En efecto, la biología sintética es un campo que recién comienza a estructurarse en la región. Aunque, tal como lo muestra el Figura 2, en los últimos años la producción científica vinculada a la temática se ha expandido considerablemente, la diferencia de magnitud en los resultados de investigación es muy acentuada respecto a potencias como Alemania, Estados Unidos o China.

Figura 2. Publicaciones en el área de biología sintética de Latinoamérica y algunas potencias científicas*



*Basado en las publicaciones (artículos, revisiones y proceeding papers) indexadas en el SCI-Expanded de la base Web of Science sobre biología sintética afiliadas a países latinoamericanos, usando el comando de búsqueda propuesto por Shapira et al. (2017).

Fuente: Elaboración propia.

A la cabeza del reciente crecimiento de la investigación latinoamericana en biología sintética se encuentran los países con las economías y comunidades científicas más grandes de la región, es decir, Brasil, México, Argentina y Chile. En estos se han constituido grupos de estudiantes que han formado parte de la competición global de biología sintética International Genetically Engineered Machine (iGEM) y se han creado los primeros centros de investigación de América Latina especializados en la disciplina.

En Brasil se han creado, a lo largo de los últimos años, múltiples espacios para la investigación en el campo. Entre estos destacan por su productividad el Laboratório de Biologia Sintética de la Universidad de Brasilia, el Laboratório de Biologia Sintética e Molecular de la Universidade de São Paulo y el Instituto Idea Real, asociado a la Universidad Federal Minas Gerais. También han incursionado en el área, aunque de forma menos sistemática, investigadores vinculados al Laboratório de Biologia Molecular Ambiental de la Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Farmacêuticas de la Universidade Estadual Paulista, el Departamento de Química de la Universidade Federal de São Carlos y el Departamento de Genética, Evolução, Microbiologia e Imunologia de la Universidade Estadual de Campinas.

Por su parte, en México, el Centro de Ciencias Genómicas, dependiente de la Universidad Nacional Autónoma de México, abrió hace algunos años la línea de investigación en biología sintética, situándose entre las principales instituciones mexicanas en el área. Asimismo, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, asociado al Instituto Politécnico Nacional, cuenta, en su línea de

ingeniería genética, con investigadores enfocados en esta área de trabajo. Una situación similar se observa en el grupo de investigación en bioprocesos del Tecnológico de Monterrey, el que ha integrado una línea de trabajo en biología sintética. Cabe apuntar que estudiantes de esta institución obtuvieron el primer lugar en la competencia internacional iGEM, en su edición 2021.

Argentina cuenta con líneas de investigación en biología sintética en el Instituto de Biología Molecular y Celular de Rosario, vinculado a la Universidad Nacional de Rosario y en el Instituto de Química Biológica de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Además, destaca la presencia de varias empresas de base científica, como INDEAR y SYTE.bio, que ofrecen servicios vinculados a la biología sintética en distintas aplicaciones.

Mientras que, en Chile, se crea el Núcleo Milenio de Biología Sintética y Biología de Sistemas Vegetales en el año 2014, el cual se convierte en uno de los pilares para la formación, en 2017, del Instituto Milenio de Biología Integrativa. Este centro reúne a investigadores de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Andrés Bello, Universidad de Santiago de Chile, Universidad Mayor y Universidad Austral de Chile, abarcando entre sus líneas de investigación el diseño y desarrollo de bucles moleculares y análisis de la memoria ambiental transcripcional.

Sin embargo, en su condición de región periférica, América Latina nunca ha logrado alcanzar un rol de peso en las redes económicas y científicas globales, siendo un actor secundario. El énfasis de sus economías se encuentra en la exportación de commodities, por lo que la inversión en I+D es muy escasa, superando solo a Asia Occidental y del Sur, África Subsahariana y Asia Central¹. Además, este gasto proviene mayoritariamente del Estado, siendo las únicas excepciones Colombia y Brasil que cuentan con una alta participación de las empresas en investigación, desarrollo e innovación (UNESCO, 2021).

Este financiamiento estatal a la investigación científica que, en la mayoría de los casos suele ser objeto de recortes y responde a la modalidad de fondos concursables, se transforma en una amenaza para la continuidad de las organizaciones formales y semiformales (centros, institutos, grupos) de investigación e innovación tecnológica en el campo. Así lo demuestra el caso de Argentina que, a pesar de su potencial en el campo, ha visto estancado su crecimiento debido a que la falta de presupuesto lleva a los grupos de investigación en el área a desintegrarse o reorientar sus actividades científicas a otras áreas en las que hay mayores recursos disponibles (Nadra et al. 2020).

De este modo, aunque algunos sistemas organizacionales logran cierta consolidación y relevancia en el campo de la biología sintética, las amenazas de su entorno (falta de financiamiento, falta de compromiso político con la investigación, etc.) pueden poner en riesgo su continuidad.

¹ De acuerdo con las cifras de la base de datos de UNESCO Institute for Statistics.

4.2. Condiciones de la democracia y el sistema político en la región

Uno de los mayores desafíos para establecer una gobernanza eficaz de la biología sintética en América Latina guarda relación con la naturaleza de sus estructuras sociales y la influencia que estas tienen en el sistema político.

La construcción de las instituciones políticas latinoamericanas, enmarcada en las guerras independentistas de principios del siglo XIX y el período inmediatamente posterior, se desarrolló sobre la base de una sociedad marcada por desigualdades abismales y la inexistencia de una identidad nacional en gran parte de la población. Ante esta realidad, el desarrollo de los proyectos nacionales fue liderado por las élites de cada país, las cuales impusieron sus ideologías e imaginarios sociopolíticos (König, 2005). Los efectos de esta particular génesis pueden apreciarse hasta el presente, en tanto los procesos asociados a las distintas esferas sociales (economía, política, ciencia, educación, etc.) son fuertemente influidos por la acción del Estado, que se transforma en el centro gravitatorio de la sociedad (Mascareño, 2000, 2003).

Esto significa que, en América Latina, las decisiones relativas a aspectos como los programas de investigación e innovación científica que se deben promover, o el tipo de regulaciones legales que se implementan, están condicionados por cuestiones de influencia política a nivel estatal o los intereses económicos de las elites que concentran la riqueza y realizan lobby en las esferas de poder estatales. La mayor inserción del subcontinente en las redes globales de comercio a lo largo de las últimas décadas ha profundizado aún más esta realidad. Este nuevo escenario incrementa la riqueza de los actores privados propietarios de grandes conglomerados económicos, lo que les otorga mayor poder y consolida su espacio de injerencia en el gobierno de asuntos públicos (Castilla et al., 2022).

Se ha sugerido que el presidencialismo latinoamericano es un arreglo institucional clave en el refuerzo de estas dinámicas de gobierno distorsionado. De acuerdo con Polga-Hecimovich (2021) la falta de institucionalización de los partidos políticos, el desequilibrio de poder entre congreso y ejecutivo y la centralización del poder en la figura presidencial, terminan incentivando el patronazgo, el diseño de políticas públicas sin visión de futuro y el debilitamiento de la autonomía burocrática. Ciertamente, la arremetida periódica de fuerzas populistas y el ascenso al poder de figuras autocráticas no contribuyen a contener esta amenaza.

A lo largo de las últimas décadas, se han llevado a cabo reformas orientadas a la modernización de los Estados latinoamericanos y a la introducción de modelos de gobernanza con un componente participativo. No obstante, factores como la poca experiencia previa en mecanismos de participación directa, la corrupción, la escasa confianza ciudadana en las instituciones y la inestabilidad política y económica han limitado la eficacia de estas reformas y el desarrollo de modelos de gobernanza (Peters y Filgueiras, 2022). Asimismo, el marco normativo que regula estos avances es profundamente restrictivo y permite a los gobernantes controlar estos procesos mediante estrategias como la limitación de los mecanismos empleados, la

estipulación de temas que no pueden ser tratados en estas instancias o los requisitos para implementar formas participativas de toma de decisiones (Cortés, 2018).

Por supuesto, bajo un orden social de esta naturaleza, la consolidación y estabilidad de los sistemas sociales y organizaciones claves se ve obstaculizada. En consecuencia, la persistencia de estas estructuras sociopolíticas, al reforzar los esquemas tradicionales de gobierno, supone una gran traba para desplegar estrategias de gobernanza participativa de la biología sintética en la región.

4.3. Factibilidad de coordinación con organizaciones de la sociedad civil

Un tercer desafío guarda relación con el alto rechazo de la población a las tecnologías asociadas a la biotecnología —especialmente a sus aplicaciones agroalimentarias— y los considerables niveles de desconfianza en la ciencia. Diversos estudios, en distintos países de la región, han dejado en manifiesto la percepción hostil hacia los organismos modificados genéticamente y la difusión de un imaginario que los asocia a riesgos sanitarios y ambientales (Tadich y Escobar-Aguirre, 2022; López et al., 2016; Benítez et al., 2021; Román et al., 2022). Aunque cabe destacar que existen excepciones a este panorama, entre las cuales se encuentran Brasil (de Castro, 2016) y Costa Rica (Gatica-Arias et al., 2019).

Además, América Latina se encuentra entre las regiones con niveles más bajos de confianza en la ciencia y los científicos, registrándose en 2018 apenas un 26% de personas que dijeron confiar mucho en la ciencia (Gallup, 2020). Si bien las cifras mostraron una mejoría en el marco de la pandemia del covid-19, es necesario esperar la evolución futura de los datos para saber si este incremento en la confianza responde únicamente a factores coyunturales.

Asimismo, y como consecuencia de las falencias de los sistemas políticos en la región, las organizaciones de la sociedad civil tienen un bajo grado de institucionalización y capacidades limitadas de interacción con el Estado (Moreno, 2021). En este sentido, la falta de tradición en instancias participativas ha obstaculizado que en el subcontinente se configuren las condiciones institucionales para que las organizaciones de la sociedad civil puedan colaborar en estructuras de gobernanza, incentivándose, por el contrario, las lógicas de conflicto y enfrentamiento entre estas organizaciones y el Estado.

En este contexto, se incrementan las posibilidades fracaso de esquemas de gobernanza que incluyan a la sociedad civil organizada, puesto que resulta bastante probable que las organizaciones sociales susceptibles de ser invitadas a participar muestren posicionamientos radicalmente hostiles hacia la biología sintética. En consecuencia, pueden tener lugar dinámicas como las descritas por Meyer (2017) en algunas organizaciones francesas, entre las cuales el debate sobre esta tecnología era concebido en términos binarios (apoyar totalmente/rechazar totalmente) y la participación en debates sobre la materia era vista como una legitimación implícita del desarrollo de la investigación y tecnologías en el campo.

De este modo, las características de América Latina, marcada por la persistencia de estructuras tradicionales y la injerencia del Estado en la operación de los sistemas sociales, inhiben la formación de acoplamientos colaborativos entre organizaciones de distintos ámbitos de la sociedad. A esto debe sumarse el escepticismo ciudadano respecto a la ciencia, el cual termina derivando en la deslegitimación de las selecciones de este sistema respecto a lo que es seguro o riesgoso.

5. CONCLUSIONES

En América Latina, el campo de la biología sintética se ha comenzado a estructurar recientemente, por lo que los debates sobre la contención de sus riesgos potenciales, su regulación y, en general, su gobernanza –a diferencia de lo que acontece en Europa y Norteamérica– es aún muy incipiente. Los avances en esta disciplina prometen enormes beneficios en distintos ámbitos, pero también pueden ser mal utilizados con consecuencias negativas para el ser humano y el medioambiente, razón por la cual los regímenes de gobernanza deben equilibrar la mitigación de sus riesgos y la promoción de oportunidades para la innovación y el desarrollo del campo (Trump et al., 2020).

A nivel global, varios modelos de gobernanza se han propuesto para la biología sintética. Entre estos modelos se encuentran las gobernanzas adaptativa y anticipatoria. Cada uno de estos acercamientos tiene un énfasis propio, a pesar de compartir la premisa fundamental del paradigma de la gobernanza relativo a que el gobierno de asuntos de interés público en las sociedades contemporáneas demanda el acoplamiento o coordinación de organizaciones de distintos ámbitos de la sociedad mediante redes no centradas en el Estado (Rhodes, 1996).

Ahora bien, la realidad latinoamericana supone obstáculos particulares para la gobernanza de la biología sintética, que se suman a los desafíos presentes a nivel global para estas tecnologías relacionados con la falta de opinión pública, la promoción de la participación y el requerimiento de evaluación constante ante las nuevas evidencias. El análisis realizado en el presente trabajo revela que, entre los desafíos específicos del contexto latinoamericano para la gobernanza de la biología sintética, destacan particularmente: (1) consolidación del campo científico, (2) condiciones del sistema político y (3) la dificultad para la coordinación con organizaciones de la sociedad civil.

América Latina se ha caracterizado históricamente por trasplantar modelos de gobernanza y políticas públicas en materia de ciencia y tecnología concebidos en contextos foráneos (Kreimer y Vessuri, 2017). No obstante, los modelos de gobernanza responden a las características de la realidad para la cual fueron contruidos, por lo que su adopción en otro contexto, sin un proceso previo de reflexión y reajuste, puede terminar en fracaso. En el caso de la biología sintética, al ser un campo disciplinar y un conjunto de tecnologías que pueden generar

controversias y que tiene asociados riesgos potenciales, la implementación de modelos no ideados para la realidad regional resulta aún menos recomendable.

La región ha tenido profundas dificultades para incorporar soluciones responsivas a los problemas complejos del siglo XXI, inclinándose por la mantención de las estructuras tradicionales altamente jerárquicas (Rodríguez, 2019). Cualquiera sea la estrategia elegida para enfrentar los desafíos que el contexto latinoamericano presenta a la gobernanza de la biología sintética, es necesario considerar las dificultades propias del acto de gobernar en las sociedades contemporáneas. En este sentido, cabe recordar que, como lo indica Innerarity (2020), los intentos de gobernar tienen más probabilidad de éxito si se conciben en el marco de la autoorganización de los sistemas sociales y el creciente empoderamiento cívico, considerando, al mismo tiempo, que los recursos de gobierno se encuentran en los intereses, pasiones y opiniones de la sociedad.

A la vista de estos antecedentes, el diseño e implementación de esquemas de gobernanza para la biología sintética en el contexto de América Latina deberá tener muy presente que, debido a su modalidad de diferenciación, los sistemas sociales en la región son especialmente resistentes a los estímulos externos. Este artículo arroja algunas luces respecto a las características propias del contexto latinoamericano que debiesen ser tomadas en cuenta en la formulación de un esquema de gobernanza para la biología sintética, al tiempo que puede ser de utilidad para reflexionar respecto a la gobernanza de otras tecnologías emergentes que se han vuelto cotidianas, como la nanotecnología (Rip, 2020) o la inteligencia artificial (Sancho García e Ivorra Alemañy, 2024). No obstante, se necesita mucho trabajo de reflexión y análisis adicional para lograr acometer con éxito la tarea de gobernar este tipo de tecnologías en la región.

REFERENCIAS

- Akpoviri, F., Zainol, Z., y Baharum, S. (2020). Synthetic biology and biosafety governance in the European Union and the United States. *IIUM Law Review*, 28(1), 37-71. DOI: <https://doi.org/10.31436/iiumlj.v28i1.520>
- Balmer, A., Calvert, J., Marris, C., Molyneux-Hodgson, S., Frow, E., Kearnes, M., Bulpin, K., Schyfter, P., Mackenzie, A., y Martin, P. (2015). Taking roles in interdisciplinary collaborations: reflections on working in post-ELSI spaces. *Science and Technology Studies*, 28(3), 3-25. DOI: <https://doi.org/10.23987/sts.55340>
- Benítez, N., Ulke, G., Gómez, P., Rezende, C., Velázquez, J., Kamada, D., Mendoza, L., y Fernández, D. (2021). Perception of genetically engineered crops in Paraguay. *GM Crops & Food*, 12(1), 409-418. DOI: <https://doi.org/10.1080/21645698.2021.1969835>

- Breitling, R., Takano, E., y Gardner, T. (2015). Judging synthetic biology risks. *Science*, 347(6218), 107. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa5253>
- Burris, S., Kempa, M., y Shearing, C. (2008). Changes in governance: a cross-disciplinary review of current scholarship. *Akron Law Review*, 41(1), 1-66. DOI: <https://ideaexchange.uakron.edu/akronlawreview/vol41/iss1/7>
- Castilla, J., Chipana, Y., y Caballero, J. (2022). Gobernabilidad en América Latina: entre la dimensión filosófica y el poder ciudadano. *Revista de Filosofía*, 39(102), 218-228. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7042316>
- CEPAL (2022). *Innovación para el desarrollo. La clave para una recuperación transformadora en América Latina y el Caribe*. Santiago: CEPAL. Obtenido en: <https://repositorio.cepal.org/items/c173aca0-8414-41c9-8414-f52b3a696c9d>
- CEPAL, FAO y IICA (2017). *La bioeconomía: oportunidades y desafíos para el desarrollo rural, agrícola y agroindustrial en América Latina y el Caribe*. Obtenido en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/42724-la-bioeconomia-oportunidades-desafios-desarrollo-rural-agricola-agroindustrial>
- Cortés, J. (2018). Self-governance in Latin America: to what extent can citizens make policy via direct democracy? *Latin American Policy*, 47(4), 673-698. <https://doi.org/10.1111/lamp.12139>
- Cummings, C., y Kuzma, J. (2017). Societal Risk Evaluation Scheme (SRES): Scenario-Based Multi-Criteria Evaluation of Synthetic Biology Applications. *PLoS ONE* 12(1), e0168564. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168564>
- de Castro, B. (2016). 15 years of genetically modified organism (GMO) in Brazil: risks, labeling and public opinion. *Agroalimentaria*, 22(42), 103-117. Obtenido en: https://www.redalyc.org/pdf/1992/Resumenes/Abstract_199245407006_2.pdf
- Delborne, J., Kokotovich, A., y Lunshof, J. (2020). Social license and synthetic biology: the trouble with mining terms. *Journal of Responsible Innovation*, 7(3), 280-297. DOI: <https://doi.org/10.1080/23299460.2020.1738023>

- Douglas, C., y Stermerding, D. (2014). Challenges for the European governance of synthetic biology for human health. *Life Sciences, Society and Policy*, 10(1), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0006-7>
- Ely, A., van Zwanenberg, P., y Stirling, A. (2014). Broadening out and opening up technology assessment: approaches to enhance international development, co-ordination and democratisation. *Research Policy*, 43(3), 505-518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.09.004>
- Federici, F., Rudge, T., Pollak, B., Haseloff, J., y Gutiérrez, R. (2013). Synthetic biology: opportunities for Chilean bioindustry and education. *Biological Research*, 46, 383-393. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602013000400010>
- Finkel, A. (2019). Designing a “Solution-Focused” Governance Paradigm for Synthetic Biology: Toward Improved Risk Assessment and Creative Regulatory Design. En B. Trump, C. Cummings, J. Kuzma, y I. Linkov (Eds.), *Synthetic biology 2020: frontiers in risk analysis and governance* (pp. 183-222). Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27264-7_9
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., y Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environmental Resources*, 30, 441-473. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>
- Gallup (2020). *Wellcome Global Monitor. How Covid-19 affected people's lives and their views about science*. Obtenido en: <https://cms.wellcome.org/sites/default/files/2021-11/Wellcome-Global-Monitor-Covid.pdf>
- Gatica-Arias, A., Valdez-Melara, M., Arrieta-Espinoza, G., Albertazzi-Castro, F., y Madrigal-Pana, J. (2019). Consumer attitudes toward food crops developed by CRISPR/Cas9 in Costa Rica. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 139, 417-427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01647-x>
- Gomez-Hinostroza, S., Gurdo, N., Alvan, M., Nikel, P., Guazzaroni, M., Guaman, L., Castillo, D., Platero, R., y Barba-Ostria, C. (2023). Current landscape and future directions of synthetic biology in South America. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1069628. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1069628>
- Gorman, M. (2012). A framework for anticipatory governance and adaptive management of synthetic biology. *International Journal of Social Ecology*

and Sustainable Development, 3(2), 64-68. DOI: <https://doi.org/10.4018/jsesd.2012040109>

Granstrand, O., y Holgersson, M. (2020). Innovation ecosystems: A conceptual review and a new definition. *Technovation*, 90-91, 102098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2019.102098>

Hagen, K. (2016). Science Policy and Concomitant Research in Synthetic Biology—Some Critical Thoughts. *NanoEthics*, 10(2), 201-213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11569-016-0267-0>

Heo, K., y Seo, Y. (2021). Anticipatory governance for newcomers: lessons learned from the UK, the Netherlands, Finland, and Korea. *European Journal of Futures Research*, 9(9), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40309-021-00179-y>

Hilgartner, S. (2012). Novel constitutions? New regimes of openness in synthetic biology. *BioSocieties*, 7(2), 188-207. DOI: <https://doi.org/10.1057/biosoc.2012.5>

Innerarity, D. (2020). *Una teoría de la democracia compleja. Gobernar en el siglo XXI*. Barcelona: Galaxia Gutenberg.

Inter-American Development Bank (2017). *Tecnolatinas. Latin America riding the technology tsunami*. Obtenido en: <https://publications.iadb.org/en/tecnolatinas-latin-america-riding-technology-tsunami>

International Risk Governance Council (2011). *Guidelines for Appropriate Risk Governance of Synthetic Biology*. Obtenido en: https://irgc.org/wp-content/uploads/2018/09/irgc_SB_final_07jan_web.pdf

Keshava, R., Mitra, R., Gope, M., y Gope, R. (2018). Synthetic biology: overview and applications. En D. Barh, y V. Azevedo (Eds.), *Omics technologies and bioengineering. Towards improving quality of life* (pp. 63-93). Cambridge: Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804659-3.00004-X>

Knorr-Cetina, K. (1996). ¿Comunidades científicas o arenas transepistémicas de investigación? Una crítica de los modelos cuasi-económicos de la ciencia. *REDES*, 3(7), 129-160.

- König, H. (2005). Discursos de identidad, Estado-nación y ciudadanía en América Latina: viejos problemas - nuevos enfoques y dimensiones. *Historia y Sociedad*, 11, 9-31. Obtenido en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/35728/23289-81187-1-PB.pdf>
- Kreimer, P. (2023). Techno-scientific promises, disciplinary fields, and social issues in peripheral contexts. *Science as Culture*, 32(1), 83-108. DOI: <https://doi.org/10.1080/09505431.2022.2101918>
- Kreimer, P., y Vessuri, H. (2017). Latin American Science, Technology, and Society: A Historical and Reflexive Approach. *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, 1(1), 17-37. DOI: <https://doi.org/10.1080/25729861.2017.1368622>
- Kuzma, J., y Tanji, T. (2010). Unpackaging synthetic biology: Identification of oversight policy problems and options. *Regulation and Governance*, 4(1), 92-112. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1748-5991.2010.01071.x>
- Lai, H., Canavan, C., Cameron, L., Moore, S., Danchenko, M., Kuiken, T., Sekeyová, Z., y Freemont, P. (2019). Synthetic Biology and the United Nations. *Trends in Biotechnology*, 37(11), 1146-1151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.05.011>
- Li, J., Zhao, H., Zheng, L., y An, W. (2021). Advances in synthetic biology and biosafety governance. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 598087. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.598087>
- López, O., Franco, E., Santos, E., Luna-Espinoza, I., y Aragón, F. (2016). Perceptions and attitudes of the Mexican urban population towards genetically modified organisms. *British Food Journal*, 118(12), 2873-2892. DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2016-0247>
- Luhmann, N. (2006a). *La sociedad de la sociedad*. D. F.: Herder/Universidad Iberoamericana.
- Luhmann, N. (2006b). *Sociología del riesgo*. México D.F.: Universidad Iberoamericana.
- Luhmann, N. (2010). *Organización y decisión*. México D. F.: Herder/Universidad Iberoamericana.

- Luhmann, N. (2020). *Comunicación ecológica. ¿Puede la sociedad moderna responder a los peligros ecológicos?* México D.F.: Universidad Iberoamericana.
- Mandel, G., y Marchant, G. (2014). The living regulatory challenges of synthetic biology. *Iowa Law Review*, 100(1), 155–200. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2410179>
- Marris, C. (2015). The Construction of Imaginaries of the Public as a Threat to Synthetic Biology. *Science as Culture*, 24(1), 83–98. DOI: <https://doi.org/10.1080/09505431.2014.986320>
- Mascareño, A. (2000). Diferenciación funcional en América Latina: Los contornos de la sociedad concéntrica y los dilemas de su transformación. *Persona y Sociedad*, 13(1), 187–207.
- Mascareño, A. (2003). Teoría de sistemas en América Latina. Conceptos fundamentales para la descripción de una diferenciación funcional concéntrica. *Persona y Sociedad*, 17(2), 1–20.
- Meyer, M. (2013). Assembling, governing, and debating an emerging science: The rise of synthetic biology in France. *BioScience*, 63(5), 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.5.10>
- Meyer, M. (2017). “Participating means accepting”: debating and contesting synthetic biology. *New Genetics and Society*, 36 (2), 118–136. DOI: <https://doi.org/10.1080/14636778.2017.1320942>
- Moreno, M. (2021). Gobernanza y sociedad civil: una revisión prospectiva desde América Latina. *Encrucijada*, 39, 18–42. DOI: <https://doi.org/10.22201/fcpys.20071949e.2021.39.79928>
- Mourby, M., Bell, J., Morrison, M., Faulkner, A., Li, P., Bicudo, E., Webster, A., y Kaye, J. (2022). Biomodifying the ‘natural’: from Adaptive Regulation to Adaptive Societal Governance. *Journal of Law and the Biosciences*, 9(1), 1–28. DOI: <https://doi.org/10.1093/jlb/ljac018>
- Mukunda, G., Oye, K., y Mohr, S. (2009). What rough beast? Synthetic biology, uncertainty, and the future of biosecurity. *Politics and the Life Sciences*, 28(2), 2–26. DOI: https://doi.org/10.2990/28_2_2

- Nadra, A., Rodríguez, P., Grunberg, R., Olalde, L., y Sánchez, I. (2020). Developing synthetic biology in Argentina: the Latin American TECNOx community as an alternative way for growth of the field. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(3), 357-364. DOI: <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1712322>
- Nordmann, A., y Rip, A. (2009). Mind the gap revisited. *Nature Nanotechnology*, 4(5), 273. DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2009.26>
- Oliver, A. (2018). Behavioral Economics and the Public Acceptance of Synthetic Biology. *Hastings Center Report*, 48(2), S50-S55. DOI: <https://doi.org/10.1002/hast.819>
- Pauwels, E. (2012). A reflection on the notion of cohabitation within and beyond the walls of life sciences. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 3 (2), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4018/jesed.2012040101>
- Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues (2010). *New Directions: The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies*. Washington D.C.: Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues. Obtenido en: https://bioethicsarchive.georgetown.edu/pcsbi/sites/default/files/PCSBI-Synthetic-Biology-Report-12.16.10_0.pdf
- Peters, G., y Filgueiras, F. (2022). Introduction: Looking for Governance: Latin America Governance Reforms and Challenges. *International Journal of Public Administration*, 45(4), 299-307. DOI: <https://doi.org/10.1080/01900692.2021.2020905>
- Polga-Hecimovich, J. (2021). The bureaucratic perils of presidentialism: political impediments to good governance in Latin America. *Journal of Policy Studies*, 36(4), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.52372/kjps36401>
- Rager-Zisman, B. (2012). Ethical and regulatory challenges posed by synthetic biology. *Perspectives in Biology and Medicine*, 55(4), 590–607. DOI: <https://doi.org/10.1353/pbm.2012.0043>
- Ribeiro, B., y Shapira, P. (2019). Anticipating governance challenges in synthetic biology: Insights from biosynthetic menthol. *Technological Forecasting & Social Change*, 139(2019), 311-320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.020>
- Rip, A. (2020). Nanotechnology and Its Governance. En A. Rip (Ed.), *Introduction: the life and times of nanotechnology and its governance* (pp.1-9). Londres: Routledge.

- Rodriguez, A. (2019). Defining Governance in Latin America. *Public Organization Review*, 19, 5-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11115-018-0427-5>
- Román, C., Chacha, K., Loja, T., Andrade, D., y Hernández, Y. (2022). Attitudes of the Ecuadorian University Community Toward Genetically Modified Organisms. *Frontiers in Bioengineering Biotechnology*, 9, 801891. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.801891>
- Rhodes, R. (1996). The new governance: governing without government. *Political Studies*, XLIV, 652-667. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9248.1996.tb01747.x>
- Rycroft, T., Hamilton, K., Haas, C., y Linkov, I. (2019). A quantitative risk assessment method for synthetic biology products in the environment. *Science of The Total Environment*, 696, 133940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133940>
- Sancho García, J., e Ivorra Alemañy, A. (2024). La irrupción de la Inteligencia Artificial (IA) en los dominios científico y social. *Sociología y Tecnociencia*, 14(2), 113-136.
- Shapira, P., Kwon, S., y Youtie, J. (2017). Tracking the emergence of synthetic biology. *Scientometrics*, 112, 1439-1469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2452-5>
- Siewert, S., Kieslich, K., Braun, M., y Dabrock, P. (2023). *Synthetic biology and the question of public participation. Governance and ethics in dealing with emerging technologies*. Cham: Springer.
- Sinden, A. (2018). Lessons from Environmental Regulation. *Hastings Center Report*, 48(2), S56-S64. DOI: <https://doi.org/10.1002/hast.820>
- Stemerding, D., Betten, W., Rerimassie, V., Robaey, Z., y Kupper, F. (2019). Future making and responsible governance of innovation in synthetic biology. *Futures*, 109, 213-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.11.005>
- Stichweh, R. (2007). The Eigenstructures of World Society and the Regional Cultures of the World. En I. Rossi (Ed.), *Frontiers of globalization research* (pp. 133-150). Nueva York: Springer.
- Stirling, A., Hayes, K., y Delborne, J. (2018). Towards inclusive social appraisal: risk, participation and democracy in governance of synthetic biology. *BCM*

Proceedings, 12(Suppl 8), 43-64. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12919-018-0111-3>

- Tadich, T., y Escobar-Aguirre, S. (2022). Citizens' attitudes and perceptions towards genetically modified food in Chile: Special emphasis in CRISPR technology. *Austral Journal of Veterinary Sciences*, 54(1), 1-8. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-81322022000100001>
- Tait, J. (2009). Governing synthetic biology: processes and outcomes. En M. Schmidt, A. Kelle, A. Ganguli-Mitra, y H. de Vriend (Eds.), *Synthetic biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 141-154). Cham: Springer.
- Tait, J. (2012). Adaptive governance of synthetic biology. *EMBO Reports*, 13(7), 579-579. DOI: <https://doi.org/10.1038/embor.2012.76>
- Tait, J., y Wield, D. (2021). Policy support for disruptive innovation in the life sciences. *Technology Analysis and Strategic Management*, 33(3), 307-319. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537325.2019.1631449>
- Thizy, D., Coche, I., y de Vries, J. (2020). Providing a policy framework for responsible gene drive research: An analysis of the existing governance landscape and priority areas for further research. *Wellcome Open Research*, 5, 173. DOI: <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.16023.1>
- Trump, B. (2017). Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore. *Health Policy*, 121(11), 1139-1146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.07.010>
- Trump, B., Cummings, C., Kuzma, J., y Linkov, I. (2018). A decision analytic model to guide early-stage government regulatory action: Applications for synthetic biology. *Regulation and Governance*, 12(1), 88-100. DOI: <https://doi.org/10.1111/rego.12142>
- Trump, B., Galaitsi, S., Appleton, E., Bleijs, D., Florin, M., Gollihar, J., Hamilton, A., Kuiken, T., Lentzos, F., Mampuy, R., Merad, M., Novossiolova, T., Oye, K., Perkins, E., Garcia-Rayero, N., Rhodes, C., y Linkov, I. (2020). Building biosecurity for synthetic biology. *Molecular Systems Biology*, 16, e9723. DOI: <https://doi.org/10.15252/msb.20209723>

- UNESCO (2021). *UNESCO science report. The race against time for smarter development*. París: UNESCO. Obtenido en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377250>
- Vallejos-Romero, A., Cisternas, C., Rodríguez, I., Cordovés-Sánchez, M., y Padilla, P. (2021). Ciencias sociales, riesgos y biología sintética: una revisión de la literatura. *Sociología y Tecnociencia*, 11(E2), 213-239.
- Van Kersbergen, K., y van Warden, F. (2004). ‘Governance’ as a bridge between disciplines: Cross-disciplinary inspiration regarding shifts in governance and problems of governability, accountability and legitimacy. *European Journal of Political Research*, 43, 143-171. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-6765.2004.00149.x>
- Wolfe, A., Campa, M., Bergmann, R., Stelling, S., Bjornstad, D., y Shumpert, B. (2016). Synthetic biology R&D risks: social-institutional contexts matter! *Trends in Biotechnology*, 34(5), 353-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.01.008>