CIENCIA Y TECNOLOGÍA: FUNDAMENTO DE LA BIOECONOMÍA

Propuestas del Foco de Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente

Volumen 3

El futuro es de todos
Gobierno de Colombia

MISIÓN DE SABIOS
COLOMBIA - 2019

CIENCIA Y TECNOLOGÍA: FUNDAMENTO DE LA BIOECONOMÍA

Propuestas del Foco de Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente

Volumen 3

Primera edición: enero del 2021

© Vicepresidencia de la República de Colombia
© Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación
© Universidad de los Andes

© Alejandro Gaviria Uribe, Esteban Manrique Reol, Federica Di Palma, Germán Poveda, Sandra Baena Garzón, Carmenza Duque Beltrán, Silvia Restrepo Restrepo, María del Pilar Noriega Escobar, Markus Eisenhauer, Guy Henry, Elizabeth Hodson de Jaramillo y Ludger Wessjohann

© Jaime Velásquez, por la traducción del capítulo "Earth Biogenome Project Colombia: una oportunidad para impulsar una bioeconomía sostenible" y del epílogo

ISBN impreso: 978-958-8290-96-6

ISBN digital: 978-958-8290-97-3

Colección Misión Internacional de Sabios 2019

Corrección de estilo: Alejandra Muñoz
Diagramación: María Victoria Mora
Diseño de la colección y cubierta:
Leonardo Fernández Suárez

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Universidad de los Andes | Vigilada Mineducación. Reconocimiento como universidad: Decreto 1297 del 30 de mayo de 1964. Reconocimiento de personería jurídica: Resolución 28 del 23 de febrero de 1949, Minjusticia. Acreditación institucional de alta calidad, 10 años: Resolución 582 del 9 de enero del 2015, Mineducación.

Nombre: Gaviria Uribe, Alejandro, autor. | Manrique Reol, Esteban, autor. | Di Palma, Federica, autora. | Poveda, Germán, autor. | Baena Garzón, Sandra, autora. | Duque Beltrán, Carmenza, autora. | Restrepo Restrepo, Silvia, autora. | Noriega Escobar, Maria del Pilar, autora. | Eisenhauer, Markus, autor. | Henry, Guy, autor. | Hodson de Jaramillo, Elizabeth, autora. | Wessjohann, Ludger, autor. | Velásquez, Jaime, traductor de epílogo.

Título: Ciencia y tecnología : fundamento de la bioeconomía Propuestas del Foco de Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente. Volumen 3

Descripción: Bogotá : Universidad de los Andes, Ediciones Uniandes : Vicepresidencia de la República de Colombia : Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2021. | 206 páginas: ilustraciones ; 21,5 x 20 cm. | Colombia Hacia una Sociedad del Conocimiento

Identificadores: ISBN 9789588290966 (rústica) | 9789588290973 (electrónico)

Materias: Biotecnología – Colombia | Bioeconomía – Colombia | Desarrollo sostenible – Colombia

Clasificación: CDD 333.7–dc23 SBUA

CIENCIA Y TECNOLOGÍA: FUNDAMENTO DE LA BIOECONOMÍA

Propuestas del Foco de Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente

Volumen 3

COMISIONADOS

Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente
Silvia Restrepo, coordinadora
Cristian Samper
Federica di Palma (Reino Unido)
Elizabeth Hodson
Mabel Torres
Esteban Manrique Reol (España)
Michel Eddi (Francia)
Ludger Wessjohann (Alemania)
Germán Poveda

Ciencias Básicas y del Espacio
Moisés Wasserman Lerner, coordinador
Carmenza Duque Beltrán
Serge Haroche (Francia, premio Nobel)
Ana María Rey Ayala
Antonio Julio Copete Villa

Ciencias Sociales y Desarrollo Humano con Equidad
Clemente Forero Pineda, coordinador
Ana María Arjona
Sara Victoria Alvarado Salgado
William Maloney (Estados Unidos)
Stanislas Dehaene (Francia)
Johan Schot (Holanda)
Kyoo Sung Noh (Corea del Sur)

Ciencias de la Vida y la Salud
Juan Manuel Anaya, coordinador
Nubia Muñoz
Isabelle Magnin (Francia)
Rodolfo Llinás
Jorge Reynolds
Alejandro Jadad

Energía Sostenible
Juan Benavides, coordinador
Angela Wilkinson (Reino Unido)
Eduardo Posada
José Fernando Isaza

Industrias Creativas y Culturales
Edgar Puentes, coordinador
Ramiro Osorio
Camila Loboguerrero
Lina Paola Rodríguez Fernández
Carlos Jacanamijoy
Alfredo Zolezzi (Chile)

Océanos y Recursos Hidrobiológicos
Andrés Franco, coordinador
Weildler Antonio Guerra
Jorge Reynolds
Juan Armando Sánchez
Sabrina Speich (Francia)

Tecnologías Convergentes Nano, Info y Cogno Industrias 4.0
María del Pilar Noriega, coordinadora
Jean Paul Allain
Tim Andreas Osswald
Orlando Ayala

Coordinador de coordinadores
Clemente Forero Pineda

RELATORES, SECRETARÍAS TÉCNICAS Y EQUIPO DE APOYO

Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente

Secretaría Técnica – Universidad de los Andes, Vicerrectoría de Investigación
Silvia Restrepo
María Fernanda Mideros
Claudia Carolina Caballero Laguna
Guy Henry

Relator
Martín Ramírez

Ciencias Básicas y del Espacio

Secretaría Técnica – Universidad Nacional de Colombia
Jairo Alexis Rodríguez López
Hernando Guillermo Gaitán Duarte
Liliana Pulido Báez

Relator
Diego Alejandro Torres Galindo

Ciencias Sociales y Desarrollo Humano con Equidad

Secretaría Técnica – Universidad del Rosario, Escuela de Ciencias Humanas
Stéphanie Lavaux
Carlos Gustavo Patarroyo
María Martínez

Relatores
Juliana Valdés Pereira
Edgar Sánchez Cuevas
Paula Juliana Guevara Posada

Ciencias de la Vida y la Salud

Secretaría Técnica – Universidad de Antioquia
Pablo Patiño

Relatores
Sara Valencia
Gabriela Puentes

Energía Sostenible

Secretaría Técnica – Universidad Industrial de Santander

Relator
Dionisio Laverde

Profesional de apoyo
Dooglas Ochoa

Industrias Creativas y Culturales

Secretaría Técnica – Pontificia Universidad Javeriana, Vicerrectoría de Investigación
Oscar Hernández Salgar
María Catalina Rodríguez
Luisa Fernanda Zorrilla

Relator
Eliécer Arenas Monsalve

Océanos y Recursos Hidrobiológicos

Secretaría Técnica – Universidad del Valle y Universidad Jorge Tadeo Lozano
Jaime Ricardo Cantera

Relatores
Francisco de Paula Gutiérrez
Enrique Peña
Carlos Edwin Gómez
César Augusto Ruiz

Tecnologías Convergentes Nano, Info y Cogno Industrias 4.0

Secretaría Técnica – Universidad EAFIT y Universidad del Norte
Mauricio Perfetti
Javier Páez Saavedra

Relatores
Mónica Lucía Álvarez Lainez
Elías David Niño

Secretaría Técnica de la Misión

Cristina Garmendia y Science & Innovation Link Office (SILO)

P13 **Prólogo**
Alejandro Gaviria Uribe

P21 *uno*
Biodiversidad, fundamento de la bioeconomía
Esteban Manrique Reol

Biodiversidad **p23**

¿Por qué es importante conocer la biodiversidad? **p24**

Patrimonio natural **p25**

Taxonomía **p26**

Colecciones científicas
y digitalización **p29**

Bancos de germoplasma **p32**

Soluciones basadas en la naturaleza **p34**

Bioeconomía **p35**

P39 *dos*
**Earth Biogenome Project Colombia:
una oportunidad para impulsar una
bioeconomía sostenible**
Federica di Palma

Introducción **p41**

El Earth Biogenome Project **p43**

Oportunidades para Colombia como país megadiverso **p45**

Una economía basada en la biodiversidad:
el proyecto piloto EBP Colombia **p46**

Conte

P53 *tres*
Garantizar la integridad de los ecosistemas de Colombia: condición básica para preservar la biodiversidad y desarrollar la bioeconomía
Germán Poveda

Introducción **p55**

Impactos de la deforestación y del agotamiento de los sistemas de soporte a la vida en Colombia **p56**

Deforestación y fuegos en Colombia: forzantes socioeconómicos y culturales **p56**

Dinámica espacio-temporal de la deforestación en Colombia **p58**

¿Cómo detener la deforestación? **p79**

Agradecimientos **p87**

P99 *cuatro*
Diversidad microbiana: desafíos y retos para la bioeconomía en Colombia
Sandra Baena Garzón

P109 *cinco*
Aportes al desarrollo económico de Colombia: biodiversidad marina, nuestro tesoro azul
Carmenza Duque Beltrán

Contexto y enfoque **p111**

Tesoro azul de Colombia **p114**

Bioproductos con mayor proyección como soportes en bioeconomía en el país **p118**

Conclusiones **p124**

P129 *seis*
Biotecnología y agricultura
Silvia Restrepo Restrepo
Biotecnología para la agricultura **p133**
Edición de genomas **p134**
Clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR) **p135**
Conclusiones **p138**

P143 *siete*
Química verde y la convergencia tecnológica
María del Pilar Noriega Escobar
Desarrollo de recurso humano y su retención **p148**
Transformación del sistema educativo **p148**
La ética en la era digital (política pública) **p149**
Alianzas públicas, privadas e internacionalización **p150**
Atracción de inversión **p150**
Mecanismos para garantizar el acceso al mercado **p151**
Equilibrio entre la academia y sistema nacional CTI **p151**
Innovación en políticas públicas: modernización y referenciación **p152**

P155 *ocho*
El modelo Fraunhofer y la investigación aplicada
Markus Eisenhauer y María del Pilar Noriega Escobar

P165 *nueve*
Bioeconomía, modelo para un desarrollo territorial sostenible e inclusivo
Guy Henry y Elizabeth Hodson de Jaramillo

Introducción **p167**

Estado del arte de la bioeconomía en Colombia **p169**

La visión de una bioeconomía para Colombia **p174**

Construcción de hoja de ruta (senderos) para la transición hacia una bioeconomía en Colombia **p176**

Condiciones requeridas para promover la bioeconomía en Colombia **p184**

Etapas a seguir y recomendaciones **p186**

P193 *Epílogo*
Reflexiones sobre ciencia en tiempos de pandemia
Ludger Wessjohann

P200 **Los autores**

enido

Pró

Prólogo

Alejandro Gaviria Uribe
Rector de la Universidad de los Andes

Este es un libro sobre la posibilidad de un futuro mejor, más incluyente, más sostenible y más respetuoso de nuestra biodiversidad y nuestra diversidad cultural. Puede leerse como una propuesta colectiva, una respuesta (parcial, como todas) a los tres grandes problemas de Colombia en estos tiempos difíciles, en esta coyuntura determinante, en el inicio tumultuoso de la tercera década del siglo XXI.

El primer problema (el orden no importa, todos están relacionados) tiene que ver con la economía, con la necesaria transformación productiva. Colombia tiene que cambiar su oferta exportadora. No puede seguir dependiendo del petróleo, el carbón y la minería a gran escala. Los países, dice el economista Ricardo Hausmann, primero exportan lo que son, pero, con el tiempo, poco a poco, se van convirtiendo en lo que exportan. Una economía centrada en la exportación de hidrocarburos no solo no tiene futuro, sino que hará muy difícil la generación de equidad y la protección del medio ambiente.

Hace apenas una década, el principal desafío económico de Colombia parecía ser el manejo de una bonanza externa, asociada a los altos precios del carbón y del petróleo. La reforma al sistema de regalías concitó, entonces, la atención del país: nuestros principales dilemas eran distributivos, cómo gastar bien y cómo hacerlo justamente. Esa realidad ilusoria quedó

ya atrás. Los problemas actuales son diferentes, a saber, cómo insertarnos en la economía global de manera incluyente y sostenible. La economía exportadora de hidrocarburos hace parte del pasado. Para bien, cabría anotar.

El segundo problema tiene que ver con la generación de empleo, la disminución de la pobreza y la adecuada inserción de buena parte de la periferia del país a la economía global. Para muchas regiones de Colombia, las economías ilegales (los cultivos de uso ilícito, la producción y exportación de cocaína, la minería ilegal y el tráfico con fauna silvestre, entre otras) siguen siendo la única forma de inserción en la economía global. En el centro del país, por otro lado, el COVID-19 ha destruido cientos de miles de empleos en los sectores mayoritarios de comercios y servicios. La pobreza ha aumentado. La desigualdad ha crecido también después de una década de progreso. Las clases medias han visto aplazadas sus aspiraciones de un mejor futuro. En fin, los problemas sociales han vuelto a estar en el centro del debate. Son prioritarios e ineludibles.

El tercer problema tiene que ver con la sostenibilidad, con el deterioro del mundo natural, la destrucción de muchos ecosistemas, la deforestación, la contaminación de los ríos, la ampliación desordenada de la frontera agrícola y la necesidad de una adaptación rápida a la crisis climática. Estos problemas superpuestos implican, como bien lo señala uno de los capítulos del libro, una obligación ética con las generaciones del futuro. Implican también una responsabilidad global. Proteger el medio ambiente es, en un país macrodiverso como Colombia, nuestro principal aporte a la humanidad, nuestra mayor contribución a los problemas existenciales del presente.

Los tres problemas mencionados (la transformación productiva, la recuperación social y la protección del medio ambiente) están relacionados. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) plantean los mismos problemas, resumen nuestros retos en tres dimensiones distintas: la económica, la social y la ambiental. Las complementariedades (y las contradicciones) entre estas tres dimensiones deben hacer parte de cualquier discusión sobre nuestro futuro, sobre una recuperación incluyente y sostenible.

Este libro es, ante todo, una propuesta al respecto, una propuesta sobre de qué manera conciliar los objetivos económicos, sociales y

medioambientales, una propuesta de transformación productiva, desarrollo social y sostenibilidad, una propuesta sobre un área promisoria que debería ser, en mi opinión, una especie de obsesión nacional: la bioeconomía.

La bioeconomía es la producción, utilización y conservación de los recursos biológicos. Busca el suministro sostenible de bienes y servicios a todos los sectores económicos. Involucra grandes encadenamientos productivos hacia adelante y hacia atrás. Es intensiva en conocimiento. Necesita, por lo tanto, una cooperación entre el sector privado y la academia. Puede, al mismo tiempo, sustentar un desarrollo equitativo, inclusivo y sostenible.

No es, por supuesto, una solución mágica. Nada lo es. Pero tiene la ventaja de estar alineada con lo que somos, con nuestra biodiversidad, la diversidad cultural, las realidades particulares de cada territorio y nuestras crecientes capacidades de investigación en biotecnología. Colombia necesita construir dos o tres grandes historias exportadoras, historias que nos conecten con el mundo, que creen una dinámica de refuerzo mutuo entre el capital humano y el desarrollo territorial. La bioeconomía, no tengo dudas, puede ser una de esas historias.

Muchas de las discusiones acerca de la sostenibilidad, y las dos crisis, la climática y la pérdida de biodiversidad, terminan en una especie de encrucijada disciplinar. Los científicos naturales señalan, con razón, la gravedad de los problemas, las posibles irreversibilidades, los complejos fenómenos de retroalimentación y, por lo tanto, la urgencia de la acción. Los científicos sociales señalan, por otro lado, la complejidad de los problemas de acción colectiva a escala global, la insuficiencia de las instituciones multilaterales, el limitado horizonte de decisión de políticos y empresarios, la pasividad global en medio de un problema acuciante y la necesidad de normas sociales distintas y un modelo de producción diferente. La mayoría de los ciudadanos entiende el problema, no lo niega, comprende la urgencia, pero actúa como si lo estuviera negando.

En medio de estas dos visiones, alarmantes sin duda, los enfoques más importantes, los imprescindibles, para usar una expresión reiterada, son los que proponen salidas y soluciones. Incompletas, inacabadas quizás, pero soluciones, al fin y al cabo. Este libro hace eso, trasciende el catastrofismo meticuloso y la resignación ilustrada y se atreve a proponer alternativas

para un futuro sostenible. Argumenta, de forma cuidadosa, exhaustiva, por qué la bioeconomía (entendida de manera amplia) es una alternativa, una posible solución.

***

En el 2007, hace ya más de una década, tuve la oportunidad de acompañar al biólogo (y uno de los campeones mundiales de la biodiversidad) Edward O. Wilson en un viaje a Mariquita (Tolima). Había venido a inaugurar la cátedra Colombia Biodiversa, una iniciativa conjunta de la Fundación Alejandro Ángel Escobar y de un grupo de ambientalistas colombianos encabezados por Christian Samper y Manuel Rodríguez.

Wilson fue a Mariquita en una peregrinación personal. Quería seguirle los pasos a José Celestino Mutis, "el primer naturalista del hemisferio occidental", y mirar con sus ojos lo que Mutis había visto con los suyos hace más de doscientos años. Estaba escribiendo un libro sobre el sabio y deseaba conocer de primera mano la geografía de su nueva obsesión, la tierra de la Expedición Botánica.

Su peregrinación lo llevó al antiguo centro de operaciones de la Expedición Botánica en Mariquita. Allí recorrió los amplios salones y el patio exuberante de la casa, estropeado por una piscina moderna, improvisada probablemente por un alcalde contratista. Agradeció con amabilidad las explicaciones de los guías locales. Dio una vuelta rápida por el patio y abandonó el lugar. Su prioridad era entrar en contacto con la naturaleza, caminar por el bosque seco tropical y visitar los alrededores del pueblo. Buscó infructuosamente una hormiga descrita por Mutis, la legionaria de cabeza grande.

Su conferencia principal en Bogotá atrajo a miles de estudiantes entusiastas que lo rodearon, una vez terminada su intervención, en busca de una foto, un autógrafo o un consejo improvisado. Allí repitió una frase que ha hecho carrera desde entonces, "Colombia es la Arabia Saudita de la biodiversidad".

La comparación es tal vez imprecisa. Podría interpretarse como un llamado a la explotación. El petróleo, además, produce un tipo de desarrollo

peculiar, desigual y divisivo; induce, incluso, cierta voracidad, una disputa organizada por los recursos que genera. Sin embargo, la comparación pone énfasis en un asunto crucial: la biodiversidad puede tener un valor económico, puede ser la clave en nuestra inserción ordenada en la economía global y nuestro desarrollo social.

Este volumen colectivo, en el que participan muchos de los más importantes científicos colombianos en el área, le da contenido a esa comparación, muestra que la bioeconomía es una alternativa viable, no solo para garantizar el crecimiento económico, sino también el progreso social y la conservación. Este libro sugiere, en últimas, una agenda esperanzadora para el futuro de Colombia. Ni mucho más, ni mucho menos.

Biodiversidad, fundamento de la bioeconomía

Esteban Manrique Reol

En este capítulo se aborda la definición de biodiversidad, cómo se llega a conocer su composición, la importancia de tener toda la información relativa a ella y su relación con la bioeconomía y el desarrollo sostenible, teniendo en cuenta que el conocimiento de la biodiversidad es la base para poder tener el más amplio espectro de las potencialidades económicas que nos pudiera brindar. Sin conocimiento no hay crecimiento social ni económico.

Biodiversidad

Aunque el término *biodiversidad* se puede definir como la diversidad de especies vegetales y animales que viven en un espacio determinado, en realidad y de acuerdo con el Convenio sobre Diversidad Biológica (CBD) de 1992 (Swingland, 2001), el concepto es más complejo y encierra mucho más: la biodiversidad es la cantidad, la variedad y la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres y marinos y otros sistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende tanto la diversidad intraespecífica, entre individuos de la misma especie, como interespecífica, entre diferentes especies, de los ecosistemas e incluso de los paisajes. La biodiversidad abarca, por

tanto, la enorme variedad de formas mediante las que se organiza la vida en la tierra. Incluye todas y cada una de las especies que cohabitan con nosotros en el planeta, sean animales, plantas, hongos, virus, protozoos o arqueas y bacterias, los propios ecosistemas y los genes que hacen que cada individuo sea diferente del resto dentro de su especie.

¿Por qué es importante conocer la biodiversidad?

Desde siempre, la biodiversidad, y sobre todo las plantas, ha suministrado al ser humano el alimento. Además, ha servido como remedio para curar dolencias y enfermedades y ha suministrado las materias primas para hacernos la vida más confortable. Incluso hoy día es el elemento fundamental en el suministro de energía renovable (*biofuel*). Conocer las diferentes especies y relacionarlas con sus características útiles nos ha proporcionado progreso económico y social en muchos niveles. Pero para usarla es necesario primero describirla y estudiarla, reunirla en colecciones para que sirvan de referencia, conservando los datos de su procedencia y las características del medio donde habita.

Pero la biodiversidad no se limita, como ya se ha dicho, a los organismos vivos, sino que también lo son los diferentes ecosistemas en los que viven. El conjunto de las especies que viven en un ecosistema hace de este un lugar único e irrepetible, en el que se desarrollan procesos biológicos y ecológicos imprescindibles para el mantenimiento de la vida en la tierra. Estos procesos regulan los ciclos de la materia y el flujo de energía. Además, nos proveen del aire limpio renovando el oxígeno a través de la fotosíntesis y permiten la infiltración del agua hacia capas más profundas purificándola. Estos procesos constituyen bienes y servicios (alimentos, medicamentos, materias primas/recursos y energía, producción de oxígeno, infiltración y purificación de agua, polinización, control de la erosión y los desastres naturales, entre otros) que aseguran la supervivencia de los

humanos, y que bien estudiados pueden ser extraídos de la naturaleza y llevados a la industria para que, en un proceso sostenible, sean utilizados de forma controlada en el desarrollo social y económico.

La biodiversidad se extiende también a los genes de los organismos y a sus productos. Los genes tienen información básica y fundamental para dirigir procesos biológicos aprovechables como la síntesis de proteínas específicas y otros productos fundamentales para la industria farmacéutica y alimentaria, entre otras, a través de la biotecnología. Conocer y distinguir qué especies tienen estas propiedades es vital para el desarrollo de una industria biotecnológica basada en moléculas y procesos biológicos que aunque serán el soporte de las soluciones a problemas de la humanidad también pueden convertirse en una acción negativa pues su aplicación no está exenta de riesgos. Es importante que los estados legislen sobre esta materia para encauzar la actividad biotecnológica (CNDH, 2019) en un desarrollo sostenible y respetuoso con la biodiversidad y el medio ambiente.

Patrimonio natural

El rico patrimonio natural de Colombia, con su gran biodiversidad, es el bien más preciado que debe conocer y conservar. Este patrimonio incluye el conjunto de bienes, recursos y servicios de la naturaleza, fuente de diversidad biológica y geológica, con enorme valor medioambiental, paisajístico, científico y cultural, y por supuesto económico. Si pudiéramos ponerle valor monetario a todos los servicios que la naturaleza nos ofrece, este representaría la mayor proporción del producto interno bruto (PIB) del país. Éstos, junto con la producción industrial, el turismo o la producción agrícola, entre otros, constituyen el verdadero producto interno bruto de Colombia y de cualquier otro país. Cómo poner valor a los servicios, ese es un tema que, aunque complejo, habría que resolver de manera urgente y para ello lo primero es conocer cada uno de estos bienes y servicios a partir de identificar las especies o el conjunto de especies que nos los ofrecen y cuantificar su valor.

Fotografías 1 y 2. Biodiversidad colombiana. Izquierda: bosques pluviales del corredor del Pacífico de Colombia. Derecha: cañones áridos interandinos del Chicamocha. Colombia
Fuente: José Luis Fernández Alonso, (Real Jardín Botánico - Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España)

Taxonomía

Para poder tomar cualquier decisión relativa a la conservación y uso de la biodiversidad se hace necesario descubrirla, conocerla y describirla de forma sistemática. Para ello lo primero es poder diferenciar cada organismo entre el resto y buscarle su lugar entre los otros seres vivos, dándole un nombre identificativo que además contenga información desde un punto de vista científico, claro e inconfundible, y que nos permita llegar hasta él sin dificultad en caso necesario. Para el estudio de la gran amplitud de

formas de vida que constituyen la biodiversidad, actual y pasada, se usa un proceso clasificatorio que se denomina *taxonomía*. Del griego *taxis* (ταξις): ordenamiento, y *nomos*: norma, regla, es la ciencia que pone normas para el ordenamiento de los seres vivos. Para llevar a cabo su función la taxonomía utiliza caracteres naturales de los organismos que reúne a los que se asemejan entre sí y los diferencia de otros. De acuerdo con este principio de semejanza se incluyen en lo que se denominan *diferentes niveles taxonómicos* o *taxones*, entre los que el nivel de especie es el más básico o de referencia. Consideramos la especie como la unidad básica de la clasificación biológica, y de forma muy general y simple lo podemos definir como el conjunto de organismos semejantes entre sí por tener una o varias características comunes. Pero el concepto de especie se encuentra siempre en revisión a medida que se van adoptando los nuevos hallazgos científicos. En la actualidad el método más usado para la diferenciación entre especies es el de la comparación de fragmentos de ADN y basado en la semejanza entre ellos.

La taxonomía es pues la ciencia que ha permitido sintetizar la biodiversidad presente y pasada de tal manera que cada organismo se agrupa o pertenece a una especie, solo a una, y que a su vez éstas se ordenan en taxones de nivel superior también excluyentes (género, familia, orden, clase, reino). La clasificación de los organismos vivos tiene, además, claras ventajas desde varios puntos de vista. Los taxones, una vez definidos, permiten hacer identificaciones exactas de organismos encontrados en cualquier lugar si éstos han sido descritos previamente. Si no es así, permitirá describirlos como especies nuevas y pasar a las bases de datos y colecciones para ser reconocidos a partir de ese momento. El sistema por tanto se revela como fundamental y necesario para todos los científicos, pero además útil para otros usuarios que trabajan con biodiversidad. La correcta definición de los taxones a nivel de especie, ligado a las características del ambiente en los que viven y a su distribución, permite además realizar predicciones sobre especies animales y vegetales que hay o que existieron en distintos territorios y de aquí deducir el tipo de ambientes pasados, cuándo se originaron esas especies, facilitar la restauración y su recuperación en lugares donde la biodiversidad original se ha perdido por

las actividades humanas o catástrofes naturales. Asimismo, por ejemplo, cuando se encuentra un compuesto de interés farmacéutico o medicinal en un ser vivo es habitual que haya interés en investigar si ese compuesto se encuentra también en otras especies relacionadas y su distribución; la taxonomía le permite al investigador delimitar su investigación y ahorrar esfuerzos de muestreo.

Fotografías 3 y 4. Biodiversidad de Colombia. Izquierda: ejemplar de *Matisia racemifera* Fern. Alonso, Malvaceae, Quibdó-Chocó. Derecha: ejemplar de *Browningia hernandezii*, una especie nueva de Cactaceae, Chicamocha, Boyacá
Fuente: José Luis Fernández Alonso (Real Jardín Botánico - Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España).

Colecciones científicas y digitalización

La descripción de los seres vivos es, por tanto, un elemento fundamental para poder gestionar la biodiversidad en todas sus dimensiones. Pero esta descripción puede perderse con el tiempo o sufrir fallos de interpretación. Para enfrentar este problema surgen las colecciones de animales y plantas en los museos de ciencias o historia natural, en los jardines botánicos, las universidades y otras instituciones con intereses en la investigación, descripción y conservación de la biodiversidad. Las colecciones científicas son ahora el referente de la biodiversidad, tanto presente como pasada; son repositorios sistematizados (bien identificados, clasificados y ordenados) de objetos de historia natural (plantas, animales, hongos y microorganismos) o partes de ellos. En muchos casos, las colecciones más antiguas se remontan hasta tres siglos atrás y conservan los ejemplares tipo, esto es, el ejemplar que sirvió para describir a la especie y que asegura la identificación inequívoca de todos los iguales. Además, junto a los especímenes se conservan ligados a ellos los datos con toda la información relativa a cada uno de ellos (nombre científico, lugar de recolección, recolector, fecha de recolección, ecosistema, etc.).

Entonces, colecciones de especímenes y bases de datos son fundamentales pues abren la posibilidad de hacer investigación sobre biodiversidad de muy diferentes formas y niveles de aproximación (distribución espacial, evolución, movimientos e invasiones en el tiempo, etc.). El espécimen en sí mismo y sobre todo el ejemplar tipo y sus datos asociados nos van a permitir realizar estudios de distribución y de presencia-ausencia; conocer si la especie estaba presente antes, si se trata de una introducción o desaparición. Las colecciones son el referente perpetuo para los científicos actuales y futuros, fuente muy valiosa de material genético y una herramienta muy potente de divulgación científica. De ahí su importancia para definir y perfeccionar estrategias para la gestión de la biodiversidad y su conservación.

Desde la segunda mitad del siglo XX ha ido creciendo el reconocimiento del valor que representan los recursos biológicos para el desarrollo social y económico de la humanidad. Pero, a la vez, ha ido aumentando la amenaza a especies y ecosistemas hasta niveles nunca antes conocidos, lo que ha movilizado a gobiernos, científicos y ciudadanos, creándose un cuerpo jurídico internacional, con ánimo de paliar el peligro que representa la desaparición de especies y ecosistemas para la vida y la economía en el planeta. Amenaza que precisamente viene desde el propio ser humano, de su forma de desarrollo sin importar la sostenibilidad de los recursos a largo plazo, contaminando las aguas, los suelos y la atmósfera y causando el cambio climático. Modelos de desarrollo insostenibles que han de ser revisados y modificados para encontrar el equilibrio con la naturaleza. Ninguna especie en la naturaleza está a merced de otra, todas cooperan para propiciar un desarrollo armónico y equilibrado.

El hito más relevante de las dos últimas décadas relacionado con la biodiversidad, la Convención sobre Diversidad Biológica (1992)[1], promovió medidas para conducir a la humanidad hacia un futuro sostenible, considerando por primera vez la importancia de la diversidad biológica en todos los niveles: ecosistemas, especies y recursos genéticos. Poco a poco, otros acuerdos internacionales se han ido sumando a la conservación de la biodiversidad. En los jardines botánicos y en los museos de historia natural, a los que se reserva un importante papel más allá de su mera función de museos, destacando la investigación, la conservación *ex situ* y la concienciación y formación que se realiza en estos y en los que las colecciones representan un recurso vital como apoyo a la ciencia, la conservación, la horticultura y la educación.

A principios del siglo XXI, y dada la enorme cantidad de datos almacenada en torno a las colecciones científicas, se ponía en marcha una iniciativa global sobre información en biodiversidad, la Global Biodiversity Information Facility (GBIF), con el fin de llevar a cabo el registro de todos los seres vivos (OECD, 1999). La GBIF es ahora la mayor red de datos abiertos en biodiversidad, en la que participan 58 países, incluido Colombia. Esta

1 Puede consultarse en www.cbd.int

red existe porque detrás de ella están los jardines botánicos, los museos de ciencias naturales, las universidades y otros centros de investigación que han conservado, no solo sus colecciones, sino toda la información (metadatos) de la que se nutre la GBIF. Gracias a la GBIF, los científicos, la industria y los gestores de la biodiversidad pueden acceder a datos que de

Fotografías 5 y 6. Izquierda: pliego de herbario de *Salvia cocuyana*, especie nueva, Herbario Nacional Colombiano-COL. Derecha: estudiantes y profesores en trabajo de campo de prospección, en el corredor Pacífico de Colombia
Fuente: José Luis Fernández Alonso (Real Jardín Botánico - Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España)

otra manera serían inaccesibles o difíciles de conseguir, para proponer planes o actuaciones de conservación o gestión y programas de investigación para el desarrollo tecnológico. Gracias a la colaboración entre estas instituciones que mantienen las colecciones y las bases de datos, la GBIF pone actualmente a disposición de las personas interesadas los nombres y la información de 1.339 millones de registros, correspondientes a 4,4 millones de especies (contabilizando sinonimias). De estos datos han surgido en los últimos diez años un total de 3.500 publicaciones científicas, de las que tan solo en el 2018, 29 corresponden a Colombia, que ocupa el puesto 12 en producción científica en biodiversidad de un total de 98 países, y el tercero de América Latina, solo detrás de Brasil y México, lo que da una idea de la capacidad investigadora colombiana[2].

Bancos de germoplasma

El genoma es la base de la variabilidad de las especies y los bancos de germoplasma son los sitios de conservación de material biológico por excelencia, cuyo objetivo es la conservación de la biodiversidad y la diversidad genética para que no se pierda por la presión de factores ambientales, físicos y biológicos, y las actividades humanas. El establecimiento de un banco de germoplasma debe ser una prioridad de todos los países preocupados por su patrimonio genético, a menudo único, con el fin de la conservación de las semillas para la conservación de la biodiversidad y la diversidad genética de las plantas cultivables, las especies silvestres, autóctonas y alóctonas, o que estén en peligro de extinción. Precisamente, mantener y promocionar la diversidad genética de los cultivos, vegetales y animales, es una barrera fundamental para contener infecciones y plagas, incluso zoonosis.

2 Puede consultarse en www.GBIF.org

Fotografías 7 y 8. Colecciones vivas del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Arriba: colección de palmeras. Abajo: colección de rosas
Fuente: Esteban Manrique (2019, RJB-CSIC)

Soluciones basadas en la naturaleza

De lo anterior queda claro que los organismos vivos constan de genes que los hacen diferentes entre sí dentro de una misma especie y entre especies. Que estos viven en la naturaleza en poblaciones y estas en comunidades que comparten un mismo espacio, el ecosistema, en el que se relacionan entre sí y con el medio. En éstos, la materia se recicla y la energía fluye. La naturaleza está pues constituida por ecosistemas diferentes en equilibrio con su entorno y de acuerdo con sus componentes llevan a cabo funciones causantes de dicho equilibrio.

De acuerdo con Cohen-Shacham *et al*. (2016), las soluciones basadas en la naturaleza se refieren a la gestión sostenible y el uso de la naturaleza para abordar los desafíos sociales como el cambio climático, la seguridad del agua y los alimentos, la provisión de salud pública y la gestión del riesgo de desastres. A partir de las estrategias tradicionales de conservación y gestión de la biodiversidad, y de complementarlas, este concepto integra de manera inherente factores sociales como el bienestar humano y la reducción de la pobreza, el desarrollo socioeconómico y los modos de gobernanza eficientes.

Las soluciones basadas en la naturaleza pueden tener diferentes enfoques: (1) restauración de ecosistemas (restauración ecológica, ingeniería ecológica y restauración del paisaje forestal); (2) reducción de desastres naturales específicos relacionados con el ecosistema; (3) creación de infraestructuras verdes con diferentes funciones; (4) gestión de espacios naturales o seminaturales basada en ecosistemas (manejo integral de zonas costeras y recursos hídricos); y (5) conservación integral de áreas protegidas. En este sentido, se hace necesaria una agenda de investigación científica que permita avanzar en el conocimiento de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, para desarrollar la comunidad de investigación en esta área y para fomentar el vínculo con las partes interesadas, academia, administración y tomadores de decisiones y empresas. Cada vez se hace más necesario innovar con la naturaleza.

Bioeconomía

Aunque otros capítulos van a tratar este tema más adelante con mucha mayor profundidad, baste aquí decir a modo de introducción en qué consiste y de qué elementos y procesos se nutre la bioeconomía. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la bioeconomía es la producción, utilización y conservación de los recursos biológicos, incluidos los conocimientos relacionados, la ciencia, la tecnología y la innovación, para proporcionarle información, productos, procesos y servicios a todos los sectores económicos, con el objetivo de avanzar hacia una economía sostenible (FAO, 2018). Para Henry *et al.* (2017) la bioeconomía representa además un modelo socioeconómico que no solo reduce la dependencia de los recursos fósiles no renovables, sino que también promueve la producción y uso del conocimiento sobre los recursos naturales, los procesos que operan en el medio natural y los principios biológicos útiles, todo ello renovable, para el suministro sostenible de bienes y servicios en todos los sectores económicos (bioenergía, agricultura y bioinsumos, alimentos, fibras, productos sanitarios, productos industriales y bioplásticos). Del mismo modo, estos autores reconocen el papel principal que desempeña el conocimiento científico y tecnológico y la capacidad de este nuevo modelo de desarrollo económico y social en la reducción de residuos en los procesos de producción, tema no menor y de alto valor añadido.

De acuerdo con la FAO, la bioeconomía está impulsada por tres grandes fuerzas: (1) la convicción de la sociedad de la necesidad de un desarrollo sostenible que repercuta en mejorar nuestra salud y la salud del planeta; (2) la necesidad de valorar y proteger los recursos biológicos (biodiversidad), incluidos los residuos, en sectores fundamentales como la producción agrícola, silvícola y pesca, la gestión del agua y de los alimentos y la bioenergía; (3) los importantes avances científicos en el campo de las tecnologías biológica y digital expandiendo las fronteras de la innovación.

La bioeconomía sostenible parece pues el nuevo paradigma del desarrollo sostenible y amigable con el medio ambiente y la salud de los

ecosistemas y su biodiversidad, entre la que se encuentra el ser humano. El tiempo y el esfuerzo que empleen los gobiernos para apoyarla en toda su dimensión será la clave que defina el éxito o el fracaso de este nuevo sistema de desarrollo social y económico.

Referencias

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. y Maginnis, S. (eds.) (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). DOI: http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en

Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH). (2019). Sobre la biodiversidad y la biotecnología y su vínculo con el pleno goce de los derechos humanos. https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-11/Estudio-Biodiversidad.pdf

Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2001). What is GBIF. https://www.gbif.org/what-is-gbif

Henry, G., Hodson, E., Aramendis, R., Trigo, E. y Rankin, S. (2017). Bioeconomy: An engine for integral development of Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). https://ciat.cgiar.org/publications/publication-details/?handle1=10568&handle2=92082

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). Global Bioeconomy Summit. Directrices para una bioeconomía sostenible. http://www.fao.org/energy/bioeconomy/es/

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD). (1999). Report of the Working Group on Biological Informatics. http://www.oecd.org/science/inno/2105199.pdf

Swingland, I. R. (2001). Definition of biodiversity. En S. Levin (ed.), *Encyclopedia of Biodiversity*, vol. 1 (pp. 377-391).

Earth Biogenome Project Colombia:

una oportunidad para impulsar una bioeconomía sostenible

Federica di Palma

Traducción de Jaime Velásquez

Introducción

En este capítulo se propone una alianza estratégica entre la iniciativa global Earth Biogenome Project (EBP) (Proyecto Biogenoma de la Tierra) y Colombia para mejorar el desarrollo del conocimiento científico y de la capacidad tecnológica como un medio para impulsar una economía sostenible basada en la biodiversidad.

El conflicto, la pobreza, la desigualdad, la baja productividad agrícola y el escaso acceso a los mercados son los principales retos a los que se enfrentan Colombia y otros países en desarrollo ricos en recursos, localizados en el Sur Global. En un país megadiverso como Colombia, las actividades bioeconómicas son fundamentales para el desarrollo equitativo, inclusivo y sostenible. El desarrollo de una bioeconomía sostenible es una de las principales opciones para el crecimiento económico sostenible, el aumento del sustento y un mejor bienestar social en estos países. Hasta la fecha, más de 50 países han elaborado estrategias de bioeconomía y políticas afines, cumpliendo los principios de la economía circular, los Objetivos del Desarrollo Sostenible, el crecimiento verde y la resiliencia ante el cambio climático. Sin embargo, Colombia apenas está empezando a desarrollar e implementar esas estrategias para entender cómo aprovechar su biodiversidad única e inestimable y así establecer y apoyar una bioeconomía global emergente. Las inversiones en proyectos ecológicos (bioenergía, agricultura, nano y bioinsumos, alimentos, fibras, productos para la salud, bioproductos y bioplásticos industriales, así como en proyectos de ecoturismo) conducen finalmente a la innovación en todo el sistema. No obstante, esta transición necesita ser respaldada por un sólido proyecto

piloto de bioeconomía capaz de demostrar su amplia aplicación potencial para impulsar el crecimiento económico de Colombia.

En el 2016, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Colciencias) creó el programa Colombia BIO con el objetivo principal de desarrollar una bioeconomía colombiana sostenible que contribuiría al menos el 2 % del producto interno bruto (PIB) para el 2025. Un objetivo clave de Colombia BIO es promover la conservación de los recursos mientras se fomentan estrategias para el uso sostenible de los valiosos recursos de la biodiversidad de Colombia en los bioproductos. La nueva administración colombiana bajo la dirección de Iván Duque (2018-2022) tiene gran interés en promover el "espíritu emprendedor" como el motor económico del país para los próximos cuatro años, facilitando la innovación impulsada por la investigación y el crecimiento económico motivado por el conocimiento, como se describe en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Pacto por Colombia, pacto por la equidad. Más recientemente, la Misión de Sabios ha presentado un informe en el que se promueve un enfoque multisectorial de la bioeconomía, haciendo énfasis en la educación y la formación de habilidades para promover el crecimiento y el desarrollo, el despliegue de la innovación, la tecnología y la investigación de vanguardia, y la inversión en las regiones para hacer avanzar la economía circular.

Colombia es un país megadiverso con instituciones públicas y privadas de excelencia en la investigación y capacidades cada vez mayores. En los últimos años, Colombia se ha embarcado en un proceso de restauración de la paz que le está permitiendo al país dar prioridad a la ampliación de sus capacidades científicas para desarrollar una economía basada en el conocimiento y la innovación en torno a la biodiversidad (Misión de Sabios, 2020). Para seguir consolidando y ampliando estos esfuerzos, es importante que el país participe en asociaciones globales estratégicas y equitativas.

El Earth Biogenome Project

El Earth Biogenome Project (EBP) (Proyecto del Biogenoma de la Tierra) es una iniciativa global que tiene por objetivo secuenciar, catalogar y caracterizar los genomas de toda la biodiversidad eucariota de la Tierra en un periodo de diez años (Lewin *et al.*, 2018). La biodiversidad eucariota incluye plantas, animales, hongos y muchos otros organismos. La importancia del EBP radica, por lo tanto, en su capacidad para promover el conocimiento detallado y fundamental de esta amplia variedad de organismos vivos e impulsar soluciones para preservar la biodiversidad y, en última instancia, sostener las sociedades humanas. La iniciativa EBP es posible gracias al uso de la tecnología de última generación para la secuenciación del genoma con el propósito principal de entender mejor, conservar y gestionar la biodiversidad para la prosperidad económica y el bienestar social.

La iniciativa EBP tiene tres objetivos principales:

1. Entender la biodiversidad y los ecosistemas. El objetivo del EBP es entender mejor las relaciones evolutivas entre los organismos vivos, así como el momento, el origen, la distribución y la densidad de las especies de la Tierra. Además, el EBP se propone desarrollar nuevos conocimientos sobre la composición y funciones de los ecosistemas, ayudar a descubrir nuevas especies y establecer leyes fundamentales para la evolución del genoma y los procesos evolutivos.
2. Conservar, proteger y regenerar la biodiversidad. La información genética es fundamental para el diseño de programas y la comprensión de cómo el cambio climático y otros fenómenos inducidos por los humanos impactan la biodiversidad. Esto es especialmente cierto para el desarrollo de programas de reproducción y planes de gestión de la conservación de las especies en peligro de extinción y que son el foco de atención del EBP. El EBP fomenta el establecimiento de bioobservatorios para monitorear la biodiversidad mediante el uso de instrumentos genómicos avanzados y portátiles en focos remotos de biodiversidad. Los bioobservatorios monitorean los

cambios en la biodiversidad, descubren nuevas especies y aumentan el compromiso del público con la ciencia.

3. Favorecer el bienestar humano. El EBP tiene como objetivo contribuir a la identificación de nuevos recursos genéticos para prestar servicios vitales de los ecosistemas para la sostenibilidad humana. El estudio del ADN es una fuente valiosa para realizar avances agrícolas y así alimentar de forma más barata, sostenible y eficiente a las poblaciones humanas en crecimiento, y que sea más rentable. También es una fuente de descubrimientos en el campo de la medicina, lo que contribuye a nuestra comprensión de los nuevos patógenos, el desarrollo de nuevos medicamentos para tratar enfermedades crónicas y control de nuevos brotes de enfermedades. Además, con estos descubrimientos se está mejorando la calidad del suelo, el aire y el agua, lo que mejora el bienestar humano y del ecosistema.

Para facilitar la implementación de estos objetivos, la iniciativa EBP apoya el desarrollo de las capacidades científicas para que se puedan utilizar las técnicas genómicas más avanzadas, los protocolos de adquisición de muestras y los estándares para la gestión de datos. Además, el EBP está estableciendo asociaciones equitativas con instituciones de todo el mundo que tienen colecciones naturales, por ejemplo, biobancos, museos de historia natural y jardines botánicos, así como con otras instituciones científicas situadas en países ricos en biodiversidad con la misión de estudiarla y preservarla.

En septiembre del 2019 Colombia se unió oficialmente a la iniciativa global EBP como el tercer país latinoamericano junto con Brasil y Chile. La nueva asociación EBP-Colombia reúne un consorcio de partes interesadas multisectoriales para facilitar la implementación de un proyecto piloto EBP-Colombia capaz de promover el crecimiento económico de Colombia. El centro de la asociación se encuentra en la Universidad de los Andes y está liderado por las profesoras Silvia Restrepo Restrepo y Federica di Palma (University of East Anglia, Reino Unido), con el firme apoyo de la Misión de Sabios, el Foco Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y la Vicepresidencia de la República.

Oportunidades para Colombia como país megadiverso

Colombia es el segundo país más diverso del mundo en términos de riqueza de especies, hábitats y diversidad de culturas. La increíble biodiversidad de Colombia es el producto de una variada geografía y de ecosistemas que van desde los bosques tropicales y los bosques de niebla costeros hasta las llanuras abiertas y humedales. Estos ecosistemas son esenciales para la economía colombiana y el bienestar de la población. Una parte importante de la economía colombiana se basa en la extracción de recursos naturales (petróleo, minería, agricultura, apropiación de tierras), por lo que es crucial la gestión ambiental (protección del agua, los suelos, el clima y la biodiversidad). Las amenazas a esa biodiversidad provienen de muchas fuentes, entre ellas, la agricultura, las industrias extractivas, el cambio climático y las especies invasoras, lo que afecta en gran medida la sostenibilidad y la resiliencia de estos ecosistemas y el sustento de las comunidades.

La Tierra ha entrado en un periodo de cambio sin precedentes definido por la pérdida de la biodiversidad, la necesidad de la conservación de las especies y los ecosistemas restaurados, los efectos del cambio climático y una población humana en rápida expansión. La pérdida de la biodiversidad y sus consecuencias en el funcionamiento y los servicios de los ecosistemas es un desafío mundial, y la salud futura del planeta dependerá del descubrimiento de nuevos biomateriales y productos farmacéuticos, y de la conservación de la biodiversidad de nuestro mundo natural.

Colombia aloja más de 51 330 especies, de las cuales aproximadamente 7639 son endémicas y 1302 especies fueron clasificadas como vulnerables o en peligro de extinción. Por ejemplo, las plantas son la fuente de una gran diversidad de proteínas y moléculas biológicamente activas que se utilizan como ingredientes industriales y como terapias humanas. La diversa flora nativa de Colombia es una fuente potencial de moléculas novedosas que, si se identifican y se accede a ellas de manera sostenible, podrían permitir el crecimiento de una bioeconomía fuerte, resolver problemas de la salud

y la industria y proporcionar beneficios socioeconómicos a las comunidades locales. Además, la fauna colombiana ofrece un novedoso potencial para las prácticas agrícolas sostenibles que podrían contribuir a la creación de nuevas industrias, desarrollar las economías locales, mejorar el bienestar de las comunidades y conservar los ecosistemas y las especies naturales.

Sin embargo, el impacto ambiental de las prácticas agrícolas y la industria minera es un problema clave para Colombia y se considera uno de los principales contribuyentes a la pérdida de la biodiversidad debido a estos factores: (a) la deforestación, (b) los procesos de extracción inadecuados, (c) la contaminación del suelo y el agua con cianuros y metales pesados como el cadmio y el mercurio que amenazan directamente la vida silvestre (después de China, Colombia es el país con el segundo nivel más alto de contaminación por mercurio), y (d) la amenaza a la seguridad alimentaria debido al consumo de productos silvestres y agrícolas contaminados por esos compuestos. En entornos tan complejos, el reto es encontrar las oportunidades para construir una sociedad pacífica y, al mismo tiempo, mantener su diversidad biológica y cultural. Por lo tanto, es fundamental invertir ahora en el crecimiento sostenible de Colombia.

Una economía basada en la biodiversidad: el proyecto piloto EBP Colombia

La Misión de Sabios desarrolló una hoja de ruta política para la ciencia, la innovación y la tecnología de Colombia fuertemente vinculada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (Misión de Sabios, 2020). En esta hoja de ruta, el Foco de Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente propuso un proyecto piloto bajo la asociación del EBP para secuenciar y caracterizar los genomas de varias especies importantes de Colombia y ponerlo a disposición de la

comunidad académica y la industria colombianas para estudios futuros. Tal piloto se llevará a cabo en colaboración con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación como parte del Programa Colombia Bio2 y explotará la biodiversidad en el país para impulsar el descubrimiento, el bienestar social y el impacto económico.

La asociación EBP Colombia reunirá una red de partes interesadas de los principales centros regionales de Colombia (tanto públicos como privados) y de socios internacionales (cuando se necesiten conocimientos complementarios). Estos incluyen: (a) investigadores académicos, (b) industrias principales, (c) comunidades de productores primarios y (d) asesores de políticas, tanto gubernamentales como expertos. Solo reuniendo el conocimiento de diferentes disciplinas y perspectivas multisectoriales podremos hacer frente a los retos de la economía emergente de Colombia y contribuir eficazmente a la formulación e implementación de políticas. Los conocimientos multisectoriales de esta asociación se basan en una visión compartida centrada en la economía fundamentada en la biodiversidad como un medio para alcanzar la sostenibilidad y la prosperidad social y económica (figura 1).

La red de socios de EBP Colombia ofrecerá:

- Adquisición de muestras, identificación, curaduría y desarrollo técnico esencial.
- Secuenciación de lectura larga de alto rendimiento y de última generación con tecnologías asociadas para entregar datos, y fuertes canales automatizados para generar ensamblajes de genomas.
- Sistemas para el procesamiento de datos, la presentación de datos y el análisis a gran escala a la comunidad en general, incluidos los instrumentos de valoración socioeconómica.
- Incentivar la participación activa de nuestros socios esenciales, pero a menudo ignorados, las poblaciones indígenas que habitan en las zonas de mayor biodiversidad, las comunidades agrícolas en general y las comunidades desplazadas que buscan reintegrarse mediante nuevas oportunidades educativas y económicas.

Figura 1. EBP-Colombia: aprovechamiento del poder de la biodiversidad colombiana para una economía sostenible y responsable
Fuente: figura elaborada por Carolina Gómez Andrade

- Recomendar y adoptar mejores prácticas para compartir el acceso y los beneficios en Colombia, lo que constituye un paso fundamental en el desarrollo de una estrategia de bioeconomía.
- Proporcionar una plataforma de formación para una generación de científicos, gerentes e industria que cruce disciplinas y contribuya a programas factibles para la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La EBP Colombia contribuirá a liberar el enorme potencial que tiene la biodiversidad del país y desarrollará el conocimiento colombiano y la capacidad necesaria para acelerar el progreso de la economía basada en la biodiversidad del país, creando nuevos conocimientos y promoviendo la innovación en la agricultura, la medicina y las industrias basadas en la biología, así como enfoques mejorados para la conservación de las especies en peligro de extinción y los beneficios económicos para las comunidades.

El EBP apoyará un modelo sostenible que integre tecnologías innovadoras (genética, modelos digitales y económicos) para generar conjuntos de datos que transformen las cadenas de valor (por ejemplo, la conservación y producción de conocimiento sobre los recursos naturales, el uso eficiente de las tierras agrícolas, la promoción del reciclaje de los desechos agrícolas y las inversiones en energías alternativas), conservando al mismo tiempo los recursos naturales (por ejemplo, la reducción de la contaminación del suelo y el agua, la recuperación de la biomasa residual) y produciendo claros beneficios ambientales, sociales y económicos que operen dentro de los límites de lo "seguro" y lo "justo" (por ejemplo, la reducción de la pobreza a largo plazo).

Por último, Colombia se encuentra en una posición única para transferir la experiencia de la EBP Colombia a otros países sudamericanos como Bolivia, Ecuador, Perú y Brasil, con el fin de desarrollar, aplicar y difundir estrategias basadas en la investigación para los desafíos comunes.

Colombia se encuentra en una posición inigualable para encabezar la contribución de América Latina a la Iniciativa Global EBP (Lewin *et al.*, 2008), apoyar todos los aspectos de un proyecto piloto colombiano del EBP, desde la ciencia básica hasta el impacto más amplio en el medio ambiente, la

economía y la sociedad del país; responder a la variedad de desafíos y oportunidades y transformarlos en acciones nacionales; proporcionar una ocasión única para influir en el futuro marco de políticas. En última instancia, la experiencia y el conocimiento científico de Colombia sobre su capital natural afirmarán una reputación de liderazgo y se convertirán en el epicentro de los descubrimientos biológicos y la inversión global.

Referencias

Lewin, H., Robinson, G., Kress, J., Baker, W., Coddington, J., Crandall, K., Durbin, R., Edwards, S., Forest, F., Gilbert, T., Goldstein, M., Grigoriev, I., Hackett, K., Haussler, D., Jarvis, E., Johnson, W., Patrinos, A., Richards, S., Castilla-Rubio, J., Van Sluys, M., Soltis, P., Xu, X., Yang, H. y Zhang, G. (2018). Earth BioGenome Project: Sequencing life for the future of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115 (17), 4325-4333. doi: 10.1073/pnas.1720115115

Misión de Sabios (2020). *Colombia hacia una sociedad del conocimiento. Reflexiones y propuestas, vol. 1.* Vicepresidencia de la República de Colombia; Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Garantizar la integridad de los ecosistemas de Colombia:

condición básica para preservar la biodiversidad y desarrollar la bioeconomía

Germán Poveda

Introducción

Al escribir estas palabras, más de 78 millones de personas han sido contagiadas y cerca de 1 800 000 han muerto en el mundo por la pandemia de COVID-19 causada por el coronavirus, SARS-CoV-2, una enfermedad zoonótica originada por el contacto entre humanos y animales silvestres (Huang *et al.*, 2020). El riesgo de contagio de zoonosis es mayor a partir de animales silvestres amenazados y en peligro de extinción por pérdida de hábitats, deforestación y cambios en los usos del suelo (Johnson *et al.*, 2020; Suárez *et al.*, 2020). Por otra parte, el cambio climático causado por la emisión de gases de efecto invernadero y por deforestación está causando graves impactos a las sociedades humanas y al medio ambiente, incluyendo la biodiversidad. El 2030 es el año límite para el colapso de la mayoría de los ecosistemas terrestres y marinos del planeta (Trisos *et al.*, 2020). Así, la deforestación está en el centro de dos amenazas urgentes para la humanidad y para la vida en el planeta. Esas dos razones deberían bastar para detener la deforestación a escala global.

Impactos de la deforestación y del agotamiento de los sistemas de soporte a la vida en Colombia

El capital natural y la extraordinaria biodiversidad constituyen las mayores riquezas de Colombia. Estas riquezas incluyen los sistemas de soporte a la vida: agua, aire, suelos, todos los tipos de biomas, bosques, páramos, sabanas, manglares, glaciares, desiertos y otras zonas de vida. Una extensión tan grande de regiones con alta significancia de la biodiversidad (figura 1) demuestra por qué Colombia es el país con mayor biodiversidad por metro cuadrado del mundo a pesar de ocupar el 0,7 % de la superficie terrestre. Colombia tiene el primer puesto a nivel global en número de especies de aves y orquídeas, el segundo en plantas, anfibios, mariposas y peces dulceacuícolas, el tercer puesto en palmas y reptiles, y el cuarto en mamíferos (WWF-Colombia, 2020). Lamentablemente, los ecosistemas colombianos están siendo destruidos, degradados y contaminados, en muchos casos en forma irreversible, al punto que los Andes tropicales son el sitio más crítico para la biodiversidad en el mundo (Myers *et al*., 2000; Poveda, 2020).

Deforestación y fuegos en Colombia: forzantes socioeconómicos y culturales

La causa principal de la deforestación de Colombia es la expansión de la frontera agrícola y ganadera (Etter *et al.*, 2006). Desde la Conquista española hasta hoy, la tenencia de tierras en Colombia ha sido sinónimo de riqueza económica, estatus social, poder político y control territorial. Por eso, la tenencia de tierras tiene un componente antropológico y sociocultural muy fuerte. La escandalosa concentración de grandes extensiones del territorio

en muy pocas manos es el principal problema social de Colombia (Machado Cartagena, 2009; Reyes Posada, 2009), y ha sido una de las principales causas del conflicto armado en Colombia (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2016, 2018). Este proceso se ha llevado a cabo mediante la deforestación de vastas zonas del país, propiciada por factores como debilidad institucional, ignorancia de sus nefastos impactos sobre el agua y el clima, auge de los cultivos ilícitos y el conflicto armado, expansión del paramilitarismo en el periodo 1990-2010, minería, tala ilegal de madera y el desarrollo de infraestructura. El acuerdo de paz entre el Estado colombiano y la guerrilla de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) provocó un aumento en las tasas de deforestación por parte de diversos actores legales e ilegales (Armenteras *et al.*, 2019; Clerici *et al.*, 2020).

Figura 1. Mapa de la significancia de la biodiversidad en Colombia

Nota: también, la contribución de cada pixel a la distribución de especies de mamíferos, aves y anfibios que dependen de los bosques. El color blanco representa los valores más bajos, mientras el morado representa los más altos

Fuente: elaborado desde Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org), con información de International Union for Conservation of Nature (IUCN), BirdLife International, and United Nations Environment World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC).

Dinámica espacio-temporal de la deforestación en Colombia

Entre el 2001 y el 2019, Colombia perdió 4,34 Mha de bosques (figura 2), equivalentes a una disminución del 5,3 % desde el 2001 y a una emisión de 1,70 Gt de CO_2. Las mayores áreas deforestadas están en el piedemonte oriental de la cordillera oriental, en la región de transición Andes-Amazonia, en la Orinoquia y vastas zonas de las cordilleras central y occidental, Antioquia, Urabá, la región Caribe y la zona del Catatumbo. La tendencia de largo plazo de la deforestación en Colombia es de 6250 ha/año, con un aumento notable del 2016 al 2018, luego del acuerdo de paz. Los cinco departamentos más deforestadores son Caquetá (figura 3), Meta, Antioquia, Guaviare y Putumayo, con casi un tercio de la deforestación del país. Preocupa la deforestación de la Amazonia colombiana (figura 4), llegando a 200 000 ha en el 2018, incluyendo áreas protegidas como los Parques Nacionales de Tinigua, Serranía de Chiribiquete y Sierra de la Macarena y la Reserva Nacional Nukak (Finer y Mamani, 2019, 2020). La deforestación también es impulsada en la Amazonia por especulación de tierras, generación de rentas, actividades agrícolas (lícitas e ilícitas) y por infraestructura vial informal (Ideam, 2018).

Fuegos

El fuego ha sido y sigue siendo la práctica más usual para cambiar el uso del suelo en Colombia, y por ello ligado con la deforestación. La serie anual del área quemada en Colombia durante el periodo 2000-2016 (no se muestra) exhibe una fuerte variabilidad interanual alrededor de un valor promedio de 20 650 km^2 por año, y la mayoría de los años con mayor área quemada coinciden con los años de ocurrencia de El Niño (y los de menor con La Niña), debido a las sequías durante El Niño en Colombia (Poveda *et al.*, 2010), favoreciendo una mayor inflamabilidad de la vegetación. Hay una alta correlación entre los valores anuales del área

deforestada y el área quemada en Colombia. En los dos paneles de la figura 5 se muestra la distribución espacial de los puntos quemados y los porcentajes de área quemada en cada pixel en el 2014. La presencia de muchos pequeños fuegos, que también causan graves impactos a la biodiversidad por la fragmentación de los ecosistemas (Monroy *et al.*, 2019), se observan no solo en la Orinoquia y Alta Amazonia de Colombia, sino también al norte de la cordillera oriental. La figura 6 presenta la distribución del número de fuegos mensuales en Colombia entre los años 2014 y 2020. La temporada pirómana es de enero a marzo.

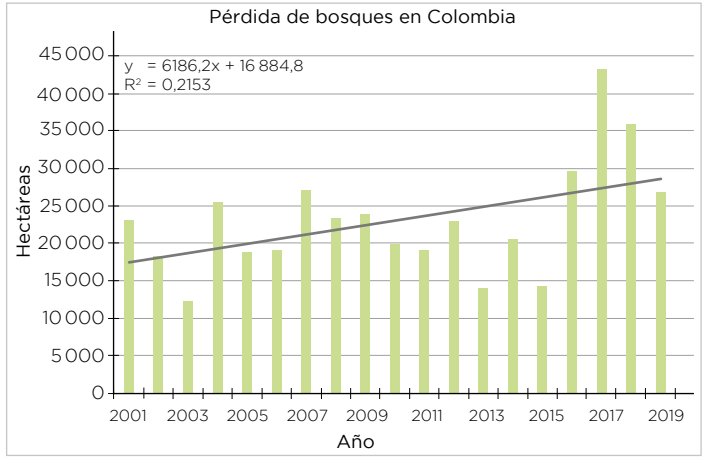
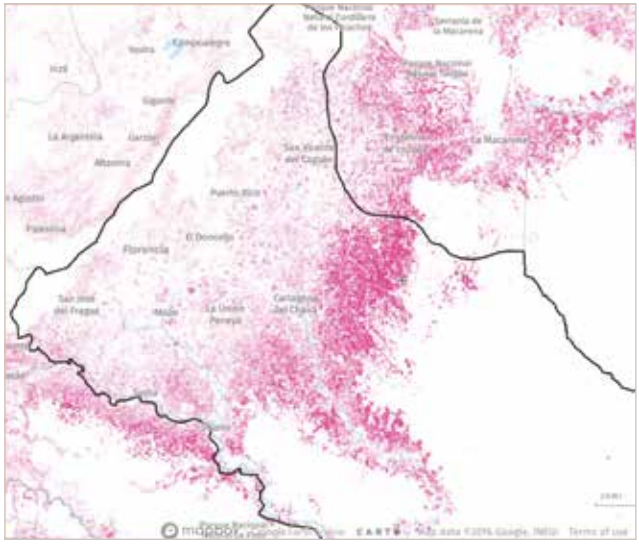
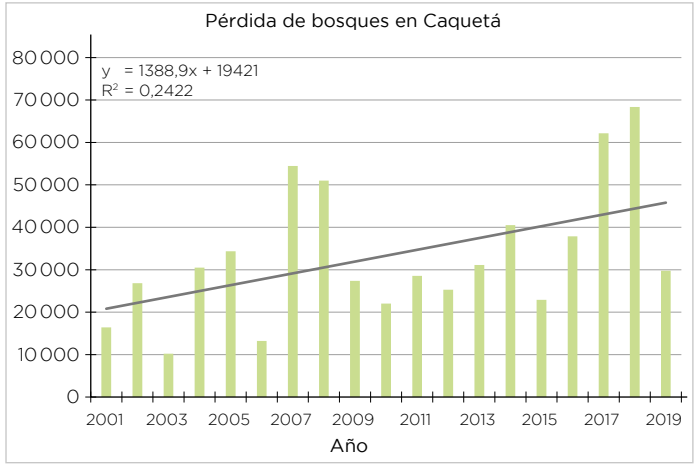


Figura 2. (Izquierda) Dinámica espacial de la pérdida de bosques en Colombia. (Derecha) Serie de tiempo anual de la pérdida de bosques entre el 2001 y el 2018
Fuente: elaboración propia con base en Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org) (Hansen *et al.*, 2013)





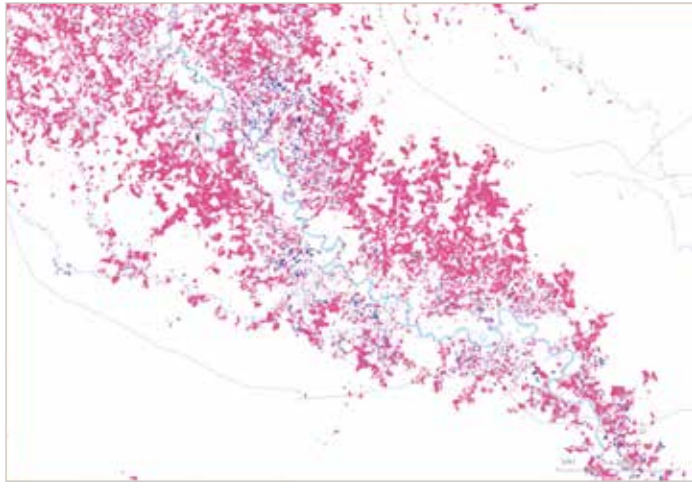


Figura 3. (Izquierda) Mapa de la pérdida de bosques (en fucsia) en el departamento de Caquetá. (Derecha superior) Serie anual de pérdida de bosques durante el periodo entre el 2001 y el 2018. (Derecha inferior) Detalle de la deforestación avanzando desde los Andes hacia la Alta Amazonia siguiendo los cauces de los ríos
Fuente: elaboración propia con información de Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org) (Hansen *et al.*, 2013)

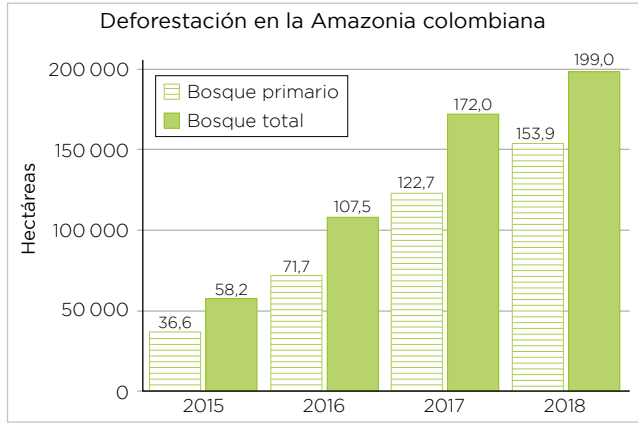


Figura 4. Serie anual del número de hectáreas deforestadas en la Amazonia colombiana entre el 2015 y el 2018, diferenciando el total de bosques (sólido) y el bosque primario (rayas)
Fuente: figura de Finer y Mamani (2019), reproducida con autorización del Proyecto Monitoreo de la Amazonía Andina (MAAP) (https://maaproject.org)

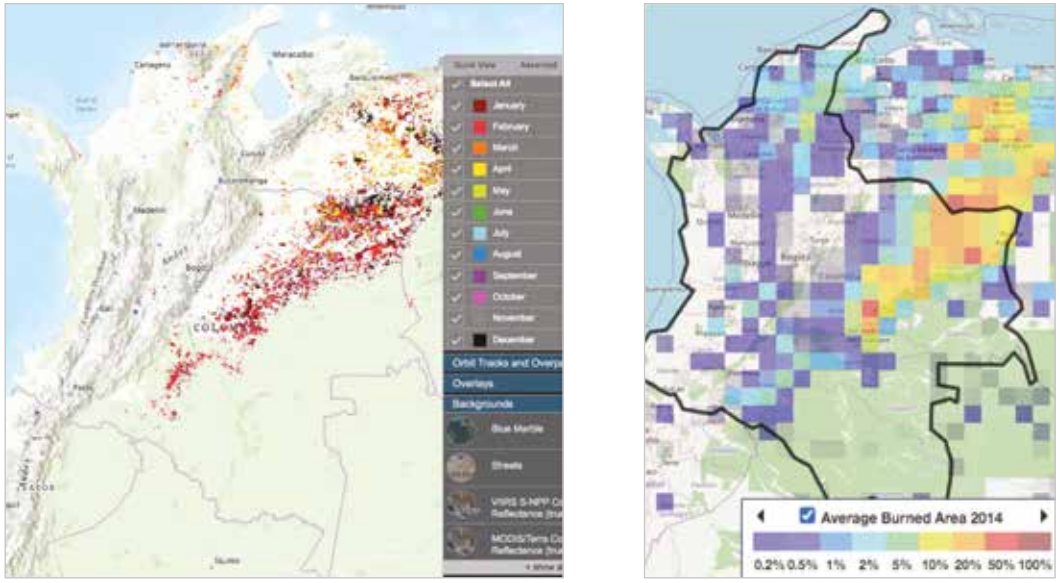


Figura 5. (Izquierda) Distribución de los puntos quemados en Colombia en el 2014, según los datos de Modis. (Derecha) Distribución del porcentaje de área quemada en cada pixel en el 2014 según los datos del Global Fire Atlas (http://www.globalfiredata.org/analysis.html)
Nota: (izq.) los diferentes colores denotan los meses del año en los cuales ocurrieron dichos fuegos.

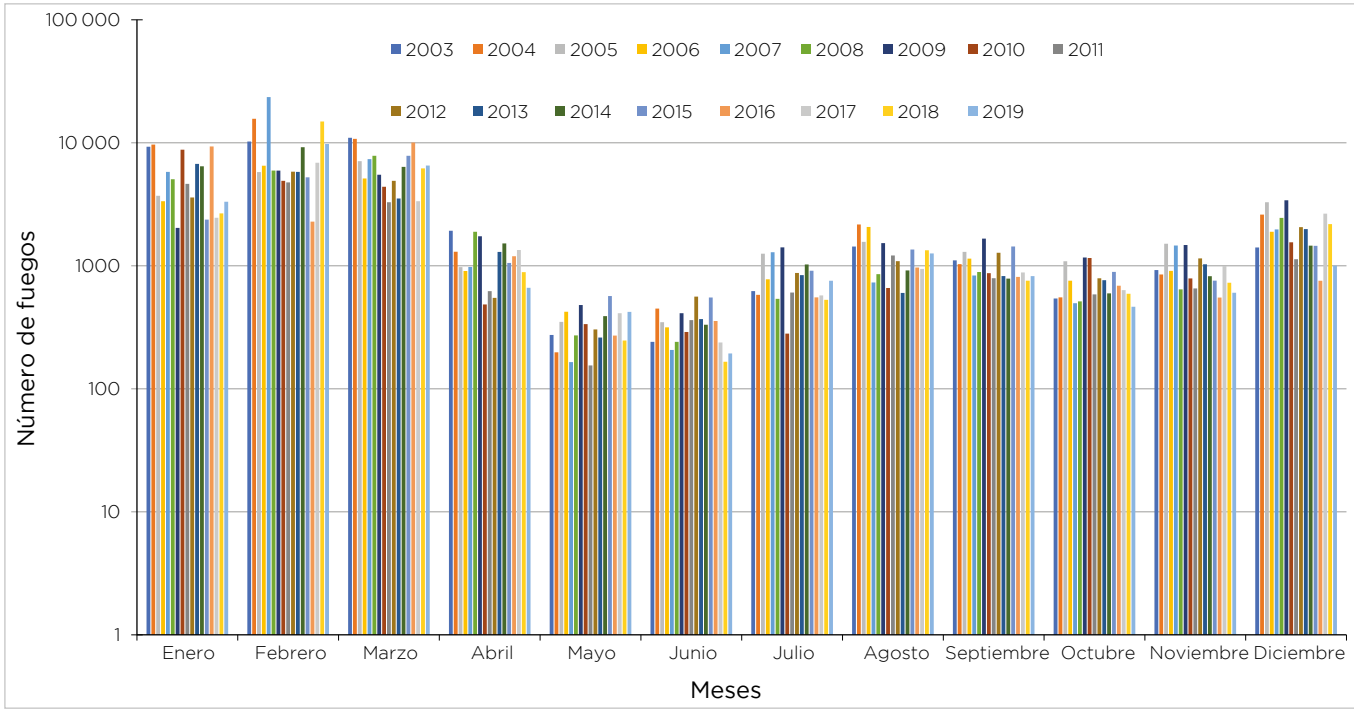


Figura 6. Distribución del número de fuegos mensuales en Colombia entre los años 2014 y 2020 detectados por el Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) a bordo del satélite Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP)
Fuente: Universidad de Maryland (http://viirsfire.geog.umd.edu/)

Principales impactos hidrológicos y climáticos de la deforestación en Suramérica tropical

Los bosques regulan los ciclos de agua, energía y carbono (figura 7) y garantizan el buen funcionamiento de los ecosistemas. Además, proporcionan bienes y servicios tales como agua limpia y suelos saludables, valorados entre 75 y 100 000 millones de dólares por año, y albergan el 80 % de la biodiversidad terrestre del mundo (IUCN, 2020). Absorben aproximadamente 2600 millones de toneladas de CO_2 por año (un tercio del emitido por la quema de combustibles fósiles), y brindan muchos otros beneficios a los humanos y a la naturaleza (Sheil *et al.*, 2019). Alrededor de 1600 millones de personas, la mayoría los más pobres, dependen de los bosques como

medio de vida. Los bosques aumentan y mejoran el proceso de infiltración de agua en el suelo y la recarga y almacenamiento de agua en los acuíferos subterráneos. También promueven la lluvia reciclada y contribuyen a mejorar y a estabilizar la lluvia regional. En condiciones adecuadas, la cobertura con bosques puede revertir procesos de sequía en regiones áridas, expandiendo la tierra disponible para más árboles (Sheil, 2018).

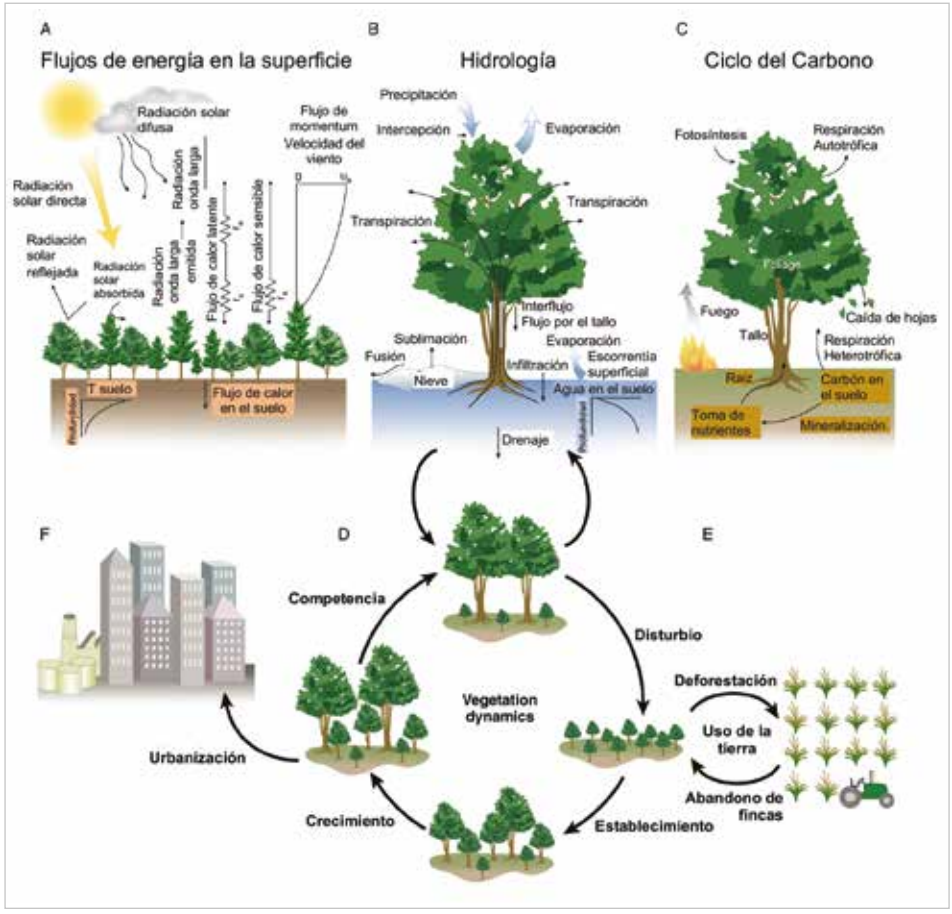


Figura 7. Los bosques desempeñan un papel fundamental en la regulación de todas las variables que hacen parte de los balances y los ciclos naturales de energía (A), de agua (B) y de carbono (C) en la superficie terrestre, desde la escala local hasta las escalas regional, continental y global. La deforestación y los cambios en los usos del suelo y la urbanización alteran la dinámica natural de tales balances (D, E, F)
Fuente: adaptada de Bonan (2008) con autorización de American Association for the Advancement of Science

En la figura 8 se muestra la pérdida de bosques en el norte de Suramérica entre el 2001 y el 2018. El 20% de la cuenca amazónica ya ha sido deforestada para ampliar la frontera agrícola y ganadera (Aguiar *et al.*, 2016), particularmente en el Arco de Fuego en el sureste amazónico. Después de un periodo de reducción de la deforestación entre el 2004 y el 2018 debido a políticas eficaces de control, la deforestación se disparó por causa de las políticas del presidente de Brasil, Jair Bolsonaro, autodenominado "Capitán Motosierra" para dejar claras sus intenciones sobre el futuro de la Amazonia, las cuales propiciaron la severa temporada de incendios durante el mes de agosto del 2019, la más intensa en una década (Nobre, 2019; Poveda *et al.*, 2019).

Figura 8. Pérdida de bosques en el norte de Suramérica (puntos fucsias) durante el periodo 2001-2018. Los límites denotan distintas cuencas hidrográficas
Fuente: Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org)

Alteración de los balances de agua, energía y carbono

Los bosques cumplen un papel fundamental en la estabilidad de los ciclos de agua, energía y carbono sobre los continentes (figura 7). La deforestación y los cambios en los usos del suelo afectan los procesos hidrológicos, climáticos y del tiempo atmosférico en un rango muy amplio de escalas espacio-temporales (Bonan, 2008). El bosque tropical lluvioso de la Amazonia es el más grande del planeta, y almacena cerca del 40% de la biomasa global de los bosques tropicales (Saatchi *et al.*, 2011).

Alteración de dinámicas atmosféricas y oceánicas de gran escala

La deforestación y los cambios en los usos del suelo en la Amazonia afectan la dinámica de la circulación atmosférica y oceánica de gran escala, a través de teleconexiones de larga distancia. Henderson-Sellers *et al.* (1993) encuentran que la deforestación ocasiona un debilitamiento del movimiento de ascenso del aire en la zona de convergencia intertropical, así como en la zona de descenso en las regiones subtropicales. McGuffie *et al.* (1995) concluyen que la deforestación amazónica altera la circulación de la celda de Hadley. Zhang *et al.* (1996) demuestran que la deforestación amazónica puede afectar el transporte de energía desde los trópicos hacia latitudes medias y altas, y una reducción del transporte de calor sensible sobre ambos hemisferios. Gedney y Valdés (2000) encuentran que la deforestación amazónica induce cambios en la precipitación y la circulación de la alta atmósfera sobre el Atlántico Norte y Europa, a través de la propagación de ondas Rossby atmosféricas. Así mismo, la deforestación amazónica reduce la precipitación en Norteamérica (Avissar y Werth, 2005) y afecta otros procesos conducentes a cambios en las precipitaciones por fuera de la Amazonia, incluyendo el sureste de Suramérica, el oeste subsahariano de África Occidental, el Congo y el sureste de Norteamérica (Badger y Dirmeyer, 2016).

Aumento de la temperatura del aire y reducción de la precipitación y la evaporación

El efecto más inmediato de la deforestación es el aumento de la temperatura, no solo por la pérdida de sombrío o por la reducción del enfriamiento evaporativo, sino por la pérdida de la conductancia aerodinámica del bosque, debilitando el transporte de calor desde la superficie hacia la atmósfera (Panwar *et al.*, 2020). La deforestación amazónica aumenta la temperatura del aire hasta en un radio de 50 km (Cohn *et al.*, 2019). En la figura 9 se muestra la tendencia creciente de la temperatura de la Amazonia. Dickinson y Henderson-Sellers (1988) calculan que la deforestación de la Amazonia podría aumentar la temperatura entre 3 y 5 °C, y disminuir significativamente la precipitación. Zemp *et al.* (2017b) estiman que una deforestación del 40 % en la Amazonia podría conducir a una reducción entre el 5 % y el 10 % en la lluvia local. Baker y Spracklen (2019) estiman una fuerte disminución en el índice de área foliar y en la evapotranspiración a causa de la deforestación amazónica, debido al aumento en la temperatura. La deforestación amazónica disminuye la evapotranspiración regional y continental (Von Randow *et al.*, 2019), con la consecuente reducción en la lluvia reciclada y en el transporte de humedad hacia regiones "viento abajo". Múltiples estudios coinciden en que la deforestación amazónica causa un aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación y la evapotranspiración a gran escala (Nobre *et al.*, 1991; Marengo *et al.*, 2018; Molina *et al.*, 2019).

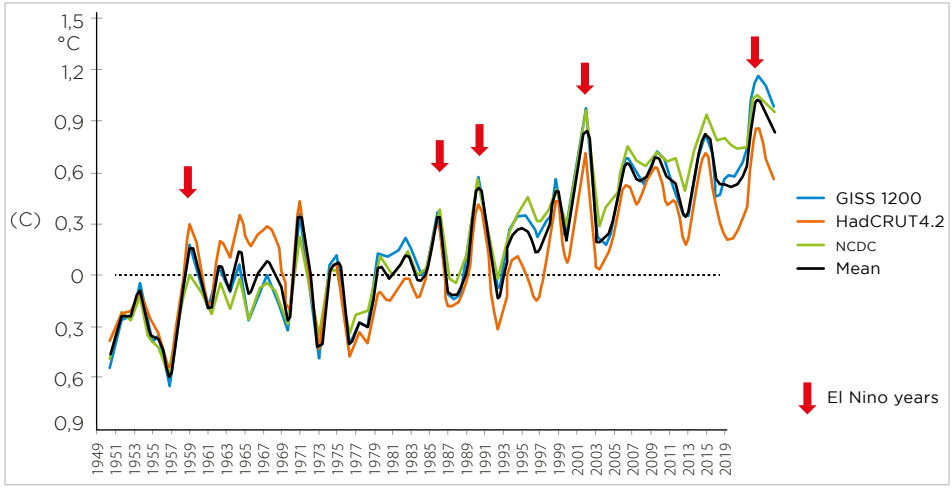


Figura 9. Anomalías (C) de las temperaturas medias del aire en la Amazonia del periodo 1949-2017

Nota: con respecto al promedio entre 1961 y 1990, según diversas fuentes de datos (a la derecha). Las flechas rojas denotan los años de ocurrencia de El Niño

Fuente: Marengo *et al.* (2018) © Frontiers Earth Science. Licencia CC BY

Temporadas secas más largas y mayores déficits de agua

La deforestación amazónica está causando el aumento en la duración de la temporada seca (DTS) (figura 10). La fecha de finalización de la temporada seca (FTS) y la DTS son unas de las limitantes climáticas claves para el mantenimiento de los bosques (Sombroek, 2001; Staver *et al.*, 2011), especialmente en el sur de la Amazonia, donde los bosques están expuestos a largas temporadas secas que los hacen más vulnerables ante los cambios en los usos del suelo. Estudios de modelación demuestran que la deforestación amazónica aumenta la frecuencia de ocurrencia (29-57 %) de estaciones secas de mayor duración en el centro y sur de la región, dependiendo de distintos escenarios de deforestación (Ruiz-Vásquez *et al.*, 2020). Muchos otros estudios revelan una disminución en las lluvias de la temporada seca en regiones deforestadas de la Amazonia (Costa y Pires, 2010; Fu *et al.*, 2013; Zou *et al.*, 2016). Por otra parte, la deforestación ha aumentado la frecuencia de días húmedos en el norte de la Amazonia, en especial, durante el periodo de marzo a mayo, causando un aumento del 17 % en la precipitación (Espinoza *et al.*, 2019), y por tanto los caudales en los ríos tributarios del norte de la región (Barichivich *et al.*, 2018).

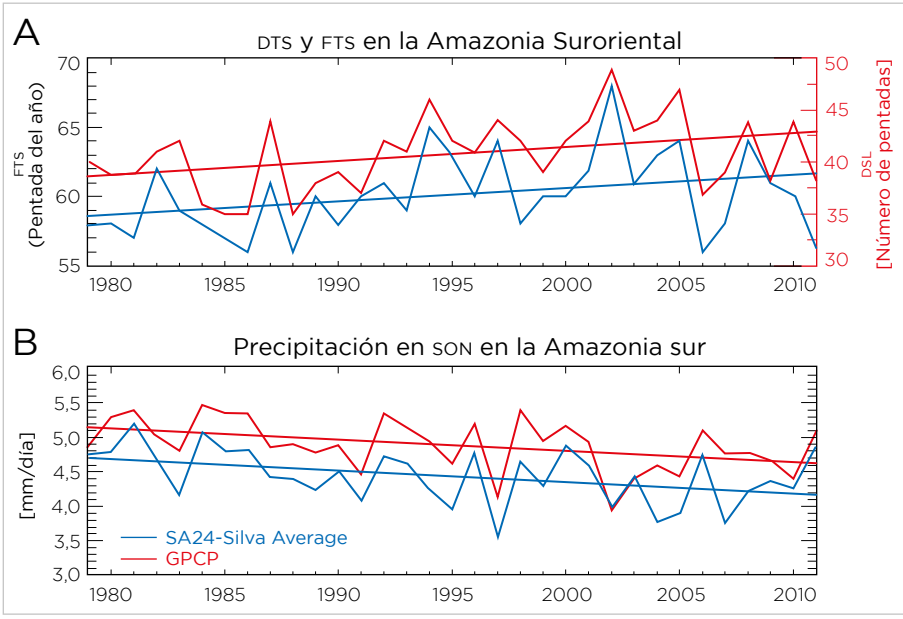


Figura 10. (Arriba) Serie anual de la duración de la temporada seca (DTS, línea roja) y de la finalización de la temporada seca (FTS, línea azul). Las unidades están dadas es pentadas (5 días). En el eje izquierdo, la pentada número 55 va del 2 al 7 de septiembre, y el número 70 va del 10 al 15 de diciembre. (Abajo) Serie anual de la precipitación en la primavera austral de dos bases de datos diferentes, en la que se observa que la disminución en la lluvia es consistente con el aumento en la duración de la temporada seca
Fuente: reproducida de Fu *et al.* (2013)
Reproducida con autorización de PNAS

Pérdida de la precipitación reciclada

El vapor de agua que forma la lluvia proviene de varias fuentes: (1) transportado por las corrientes de vientos de la atmósfera, (2) evapotranspirada por las plantas; (3) evaporada desde el suelo y los cuerpos de agua. La proporción de la lluvia que tiene su origen en la evapotranspiración de la vegetación local se denomina *precipitación reciclada*. En la figura 11 se observa que el agua que se precipita como lluvia proviene de los términos de transporte de humedad por los vientos, C, y por la precipitación reciclada, P_r. El bosque amazónico mantiene altas tasas de evapotranspiración, aun durante la temporada seca. En promedio, la transpiración del bosque amazónico constituye el 70 % de la evaporación (Kumagai *et al.*, 2005). Por esto la precipitación reciclada asciende al 35-55 % de la precipitación en la cuenca (Salati, 1987; Zemp *et al.*, 2014, 2017a; Staal *et al.*, 2018).

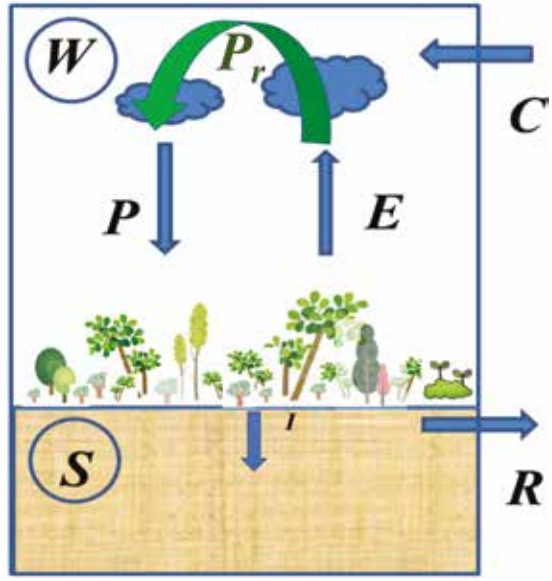


Figura 11. Ilustración de los depósitos y flujos de agua en una cuenca hidrográfica

Nota: las variables encerradas en un círculo representan, respectivamente, el almacenamiento de agua en la atmósfera (*W*) y en el subsuelo (*S*). Las demás variables representan los flujos de agua: precipitación (*P*), evapotranspiración (*E*), escorrentía superficial (*R*), transporte neto (entradas menos salidas) de vapor de agua por los vientos (*C*), e infiltración (*I*). La precipitación que tiene origen en la evapotranspiración de la vegetación de la misma cuenca, denotada con la flecha verde, es la precipitación reciclada (P_r)

Fuente: elaboración del autor

La figura 12 ilustra la importancia de la Amazonia sobre procesos hidrológicos y climáticos del norte de Suramérica, incluyendo la precipitación reciclada. Se observan altos valores de la precipitación reciclada en la Baja Amazonia (35-55 %), y mucho mayores en los Andes (60-90 %). Es decir que la Amazonia exporta vapor de agua hacia los Andes, el cual se condensa y cae como lluvia sobre la cordillera, para reevaporarse y volver a llover localmente.

Hay que detener la deforestación de los Andes tropicales, dado el gran porcentaje de la lluvia reciclada en la región. El panel (c) de la figura 12 presenta la fracción de lluvia que cae en cada pixel proveniente de evaporación del océano Atlántico. Sobre los Andes es muy poca la lluvia que proviene del océano, ratificando la importancia de la precipitación reciclada que se muestra en los paneles (a) y (b). El panel (d) muestra el porcentaje de lluvia que cae en cada pixel proveniente de la transpiración de los árboles amazónicos, haciendo evidente la importancia de la evapotranspiración del bosque amazónico para sostener las lluvias de los Andes.

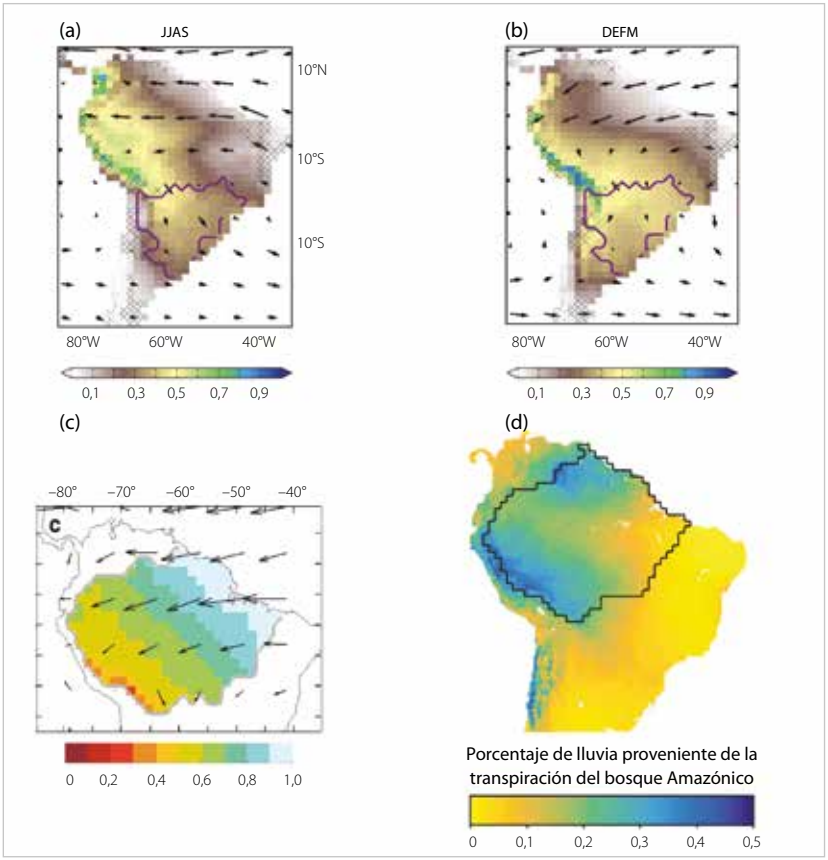


Figura 12. Influencia de los procesos hidrológicos en la Amazonia sobre las lluvias de Suramérica

Notas: (a) Mapa del porcentaje de precipitación reciclada en cada uno de los pixeles, para la estación seca (junio-septiembre), y (b) para la estación lluviosa (diciembre-marzo). Los vectores indican el campo de flujo de humedad integrado verticalmente (en m^3 de humedad × m^{-2} × mes^{-1}).

Fuente: Zemp *et al.* (2014). Licencia cc

(c) Fracción de la precipitación total de la estación seca (junio-noviembre) que proviene de evaporación del océano.

Fuente: Zemp *et al.* (2017a), © Nature Communications. Licencia cc

(d) Fracción de la lluvia promedio anual que es transpirada por los árboles de la Amazonia.

Fuente: Staal *et al.* (2018). © Nature Climate Change. Reproducida con autorización de Springer Nature

Debilitamiento de la cascada de circulación de humedad en el sistema suelo-vegetación-atmósfera

El mecanismo descrito en la sección anterior, relacionado con el flujo del agua que se da en la interacción suelo-vegetación-atmósfera en la Amazonia, se resume como un eficaz proceso de recirculación en cascada (precipitación → humedad de suelo a través de la infiltración → evapotranspiración → transporte de humedad por los vientos → precipitación →...) que fluye con

el viento (Zemp *et al.*, 2017a, b). La figura 13 muestra los impactos de la deforestación sobre ese proceso en cascada. Dos tercios de la precipitación reciclada en la Amazonia provienen de la transpiración del bosque (Staal *et al.*, 2018), así que la retroalimentación en cascada entre el suelo, la vegetación y la atmósfera (vía *E*, P_r y C, en la figura 11) protege contra los efectos de la sequía y revela el mecanismo por el cual la deforestación compromete la resiliencia del bosque amazónico ante eventos extremos climáticos actuales y futuros.

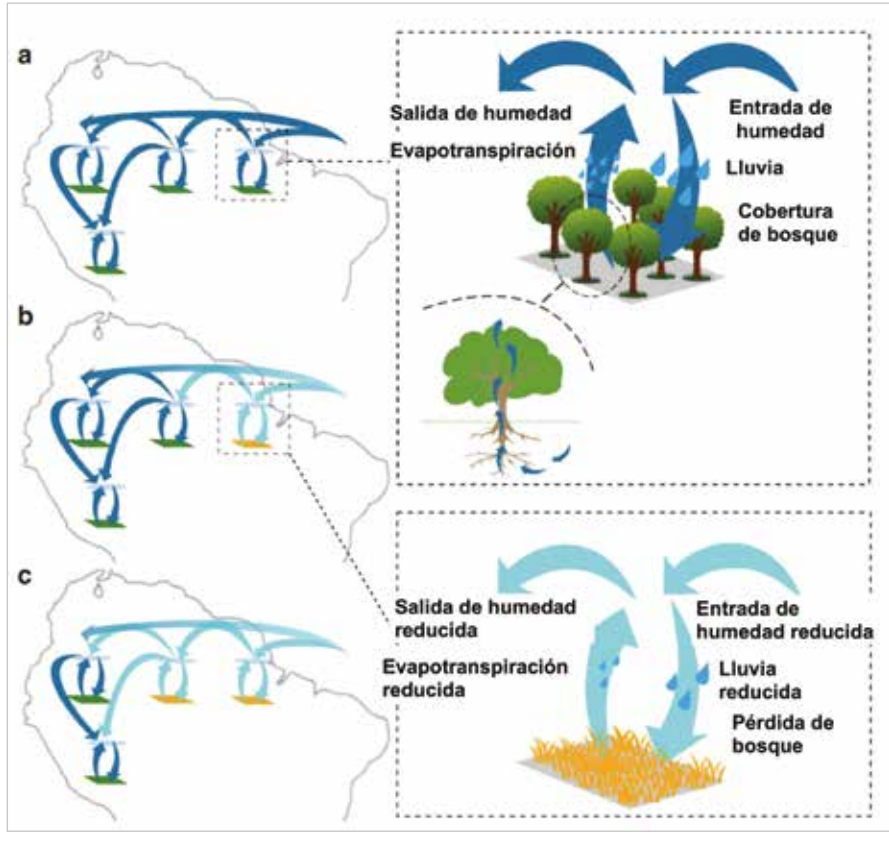


Figura 13. Dinámica de la cascada de circulación de humedad en la Amazonia a través de la interacción suelo-vegetación-atmósfera

Nota: (a) Sistema vegetación-atmósfera en equilibrio. (b) Efectos de la deforestación y de la reducción del influjo desde el océano Atlántico. Esto reduce la evapotranspiración local y el transporte de humedad por el viento. (c) Como resultado, el régimen de lluvias se altera en otros lugares, causando una posterior pérdida de bosques y un menor transporte de humedad.

Fuente: Zemp *et al.* (2017). © Nature Communications. Licencia cc. Texto traducido del inglés

"Sabanización" permanente de la Amazonia

Múltiples estudios han mostrado que la deforestación amazónica causaría el colapso del bosque húmedo tropical, tal que se convertiría en una sabana tropical por la reducción de la lluvia, el aumento de la temperatura y la retroalimentación positiva entre la deforestación y la reducción de la lluvia (Zemp *et al.*, 2017b; Staal *et al.*, 2018). Dicha transición ocurriría de manera súbita al cruzar puntos críticos de inflexión (*tipping points*), como un aumento de 4 °C en la temperatura o un porcentaje de área deforestada mayor del 40 %. Ese proceso de "sabanización" de la Amazonia sería especialmente notable en el sureste de la región (Oyama y Nobre, 2003; Hirota *et al.*, 2011; Zemp *et al.*, 2017a; Lovejoy y Nobre, 2018).

El ritmo de ese proceso dependerá de (1) la habilidad que tenga el bosque de aumentar el consumo de carbono en distintos escenarios de aumentos de CO_2 en la atmósfera asociados con el calentamiento global (Rammig *et al.*, 2010), y (2) el impacto que tendría la interrupción del mecanismo de reciclado de humedad sobre la estabilidad del bosque (Zemp *et al.*, 2017b).

Debilitamiento de los ríos aéreos sobre Suramérica

La distribución de la lluvia en el norte de Suramérica depende de diversos mecanismos de la circulación atmosférica de gran escala y de la dinámica de los océanos circundantes. Pero la barrera orográfica de los Andes, el ya mencionado reciclaje de la precipitación a través de la evapotranspiración y las interacciones dinámicas de doble vía entre el suelo, la vegetación y la atmósfera también desempeñan un papel fundamental (Poveda y Mesa, 1997; Builes-Jaramillo *et al.*, 2017; Zemp *et al.*, 2014, 2017; Bedoya-Soto *et al.*, 2018).

De igual importancia para la lluvia continental es la dinámica espacio-temporal de los *ríos aéreos*, análogos a los ríos superficiales, cuyas trayectorias han sido estudiadas por Moraes-Arraut *et al.* (2012) y Poveda *et al.* (2014) (figura 14). Esto pone de presente la importancia del bosque para generar su propia lluvia a través de la evapotranspiración, la precipitación reciclada

y la cascada “viento abajo” mencionada anteriormente. La deforestación reduce el caudal de los ríos aéreos por menor evapotranspiración, menor reciclaje de la lluvia y menor aporte de humedad a las lluvias de regiones “viento-abajo”, incluyendo la cordillera de los Andes y el Río de La Plata.

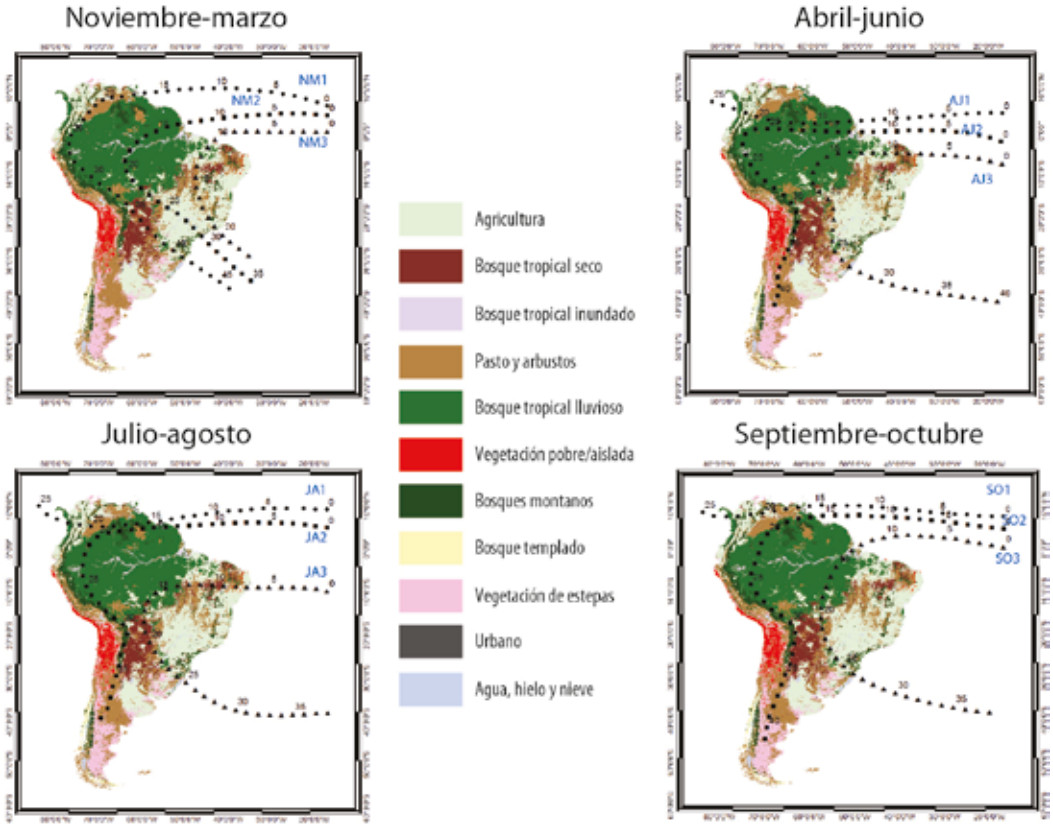


Figura 14. Trayectorias de los ríos aéreos sobre Suramérica durante las distintas estaciones del año y superpuestas sobre la distribución de las coberturas vegetales según la escala de colores en la parte del medio del panel superior

Fuente: © American Geophysical Union. Adaptada de Poveda *et al.* (2014) con autorización de John Wiley and Sons

Disminución del transporte de humedad hacia los Andes

Los ríos aéreos transportan humedad atmosférica desde el océano Atlántico hacia la Orinoquia y la Amazonia, y de allí al resto del continente (figura 14) (Marengo *et al.*, 2004; Nobre *et al.*, 2009; Moraes-Arraut *et al.*, 2012; Poveda *et al.*, 2014; Trachte, 2018). Los Andes y la Amazonia conforman un sistema de retroalimentación recíproca. La Amazonia exporta vapor de agua evapotranspirado por el bosque por los vientos de la baja atmósfera, y los Andes exportan agua líquida, sedimentos y nutrientes a la baja Amazonia por los ríos que nacen en su vertiente oriental (Builes-Jaramillo y Poveda, 2018). La figura 15 ilustra los flujos de agua superficiales y atmosféricos en el sistema acoplado Andes-Amazonia.

La barrera orográfica de los Andes también cumple un papel importante en la distribución espacio-temporal de la lluvia en el norte de Suramérica. Los vientos provenientes de la Amazonia son forzados a ascender por la cordillera, causando su enfriamiento y condensación, lo cual explica la alta pluviosidad del piedemonte oriental de los Andes (Vizy y Cook, 2007; Junquas *et al.*, 2018), y el gran lago atmosférico localizado en el costado occidental de la Amazonia andina (Moraes-Arraut *et al.*, 2012; Poveda *et al.*, 2014). Por ello, la región andina de la Amazonia ha sido identificada como una de las regiones más afectadas en cuanto a la disponibilidad de agua debido al debilitamiento del caudal de los ríos aéreos, por la deforestación amazónica (Weng *et al.*, 2018).

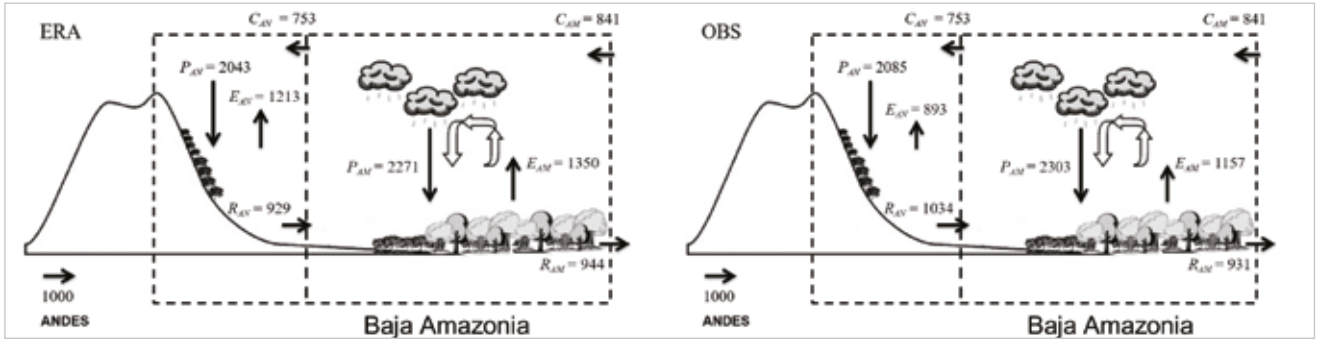


Figura 15. Componentes de los balances de agua superficial y atmosférica basados en datos del Reanálisis ERA-Interim (izquierda) y observaciones (derecha), para las subregiones de los Andes y la Baja Amazonia pertenecientes a la cuenca del río Amazonas

Nota: *P*, precipitación; *E*, evapotranspiración real; *R*, escorrentía superficial; *C*, transporte neto de humedad. Los valores están dados en unidades de mm/año

Fuente: Builes-Jaramillo y Poveda (2018). © American Geophysical Union. Reproducida con autorización de John Wiley and Sons

Disminución del aporte de agua atmosférica a los páramos y glaciares y amenaza al suministro de agua y la calidad del aire en las ciudades andinas

La dinámica hidrológica de la cuenca amazónica también es fundamental para proveer el agua atmosférica de las regiones más altas de los Andes, incluyendo los páramos y los glaciares (Vizy y Cook, 2007). Por esto, la deforestación amazónica y andina contribuyen y contribuirán al actual retroceso de los glaciares andinos debido al calentamiento global (Vuille *et al.*, 2018). Muchas ciudades y pequeñas poblaciones andinas dependen del agua atmosférica importada desde la Amazonia, y por ello la deforestación amazónica y el cambio climático atentan contra la disponibilidad de agua para ciudades como Bogotá, Quito, Lima y La Paz, entre muchas otras (Soruco *et al.*, 2015). Además, los vientos que circulan desde la Baja Amazonia hasta los Andes también transportan bióxido y monóxido de carbono, y "carbón negro" (humo y hollín) proveniente de los incendios de la Amazonia entre los meses de agosto a octubre (figura 16). Los incendios y las quemas sobre la Amazonia contribuyen a su empobrecimiento biogeoquímico y ecológico, y al derretimiento de los glaciares andinos, dado que el "carbón negro" se deposita en las cumbres andinas, disminuyendo la reflexión de la radiación solar, aumentando el calentamiento y, por tanto, acelerando el derretimiento de los glaciares (Magalhães *et al.*, 2019).

Alteración del chorro superficial de Suramérica y amenaza al suministro de agua y la calidad del aire en la cuenca del Río de la Plata

Uno de los mecanismos físicos más destacados en la circulación atmosférica del llamado sistema del monzón de Suramérica (SMSA) es el chorro superficial de Suramérica al este de los Andes (SALLJ) (Vera *et al.*, 2006a; 2006b), una corriente de vientos del noroeste que fluye paralelo a los Andes, que se extiende desde el suroeste de la Amazonia hasta el sureste de Suramérica (figura 17). Diversos estudios han demostrado que la deforestación amazónica altera el clima de la región del SMSA (Sampaio *et al.*, 2007).

Tanto el SALLJ como los ríos aéreos de la cuenca amazónica contribuyen con un 20% del transporte de humedad atmosférica para la precipitación en el Río de la Plata (Montini *et al.*, 2019). La deforestación de la Amazonia y la consecuente disminución en los procesos de evapotranspiración y de transporte de humedad por los vientos reducirían fuertemente la lluvia en el sureste de Suramérica, poniendo en riesgo el suministro de agua para ciudades como São Paulo, Río de Janeiro, Buenos Aires, Montevideo, etc. Asimismo, dado que los sistemas de circulación atmosférica también transportan humo, hollín y carbón negro provenientes de los incendios amazónicos (Marengo *et al.*, 2008), no es de extrañar la noche en pleno día que vivió en São Paulo en agosto del 2019, como resultado de los incendios propiciados por las políticas de Bolsonaro en Brasil. De manera que la deforestación amazónica también tiene impactos directos sobre la calidad del aire en el sureste del continente, con graves amenazas a la salud pública.

Figura 16. (Izquierda) Distribución del monóxido de carbono en la atmósfera, proveniente de los incendios en la Amazonia (derecha) entre el 8 y el 22 de agosto del 2019
Fuente: (izquierda) Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) a bordo del satélite Aqua de la NASA. NASA/JPL-Caltech. (Derecha) *The Extinction Chronicles*. Foto de Victor Moriyama/Greenpeace

Figura 17. Esquema de los mecanismos que hacen parte del transporte de humedad hacia las altas latitudes en Suramérica

Nota: las flechas verdes denotan el transporte de humedad desde el océano Atlántico tropical y sur, respectivamente. La flecha azul representa el chorro superficial de Suramérica (SALLJ). El diagrama insertado muestra una sección transversal del SALLJ fluyendo desde el norte paralelo a los Andes

Fuente: Vera *et al.* (2006b)
© American Meteorological Society. Utilizada con autorización

Pérdida del embalse forestal e intensificación de los eventos hidrológicos extremos

Una de las consecuencias más negativas de la deforestación es la intensificación en la frecuencia y magnitud de los eventos hidrometeorológicos extremos como las inundaciones de los ríos, pero también las sequías hidrológicas. Un estudio reciente de Salazar *et al.* (2018) hace posible caracterizar el régimen hidrológico de cualquier cuenca hidrográfica, y encuentra que si la deforestación excede el 60-70% (umbral crítico) en las subcuencas de la cuenca amazónica, pasan de estar en un estado regulado a otro no regulado, haciendo más severas las inundaciones y las sequías. Esto sucede por el efecto de regulación natural que ejercen los bosques para regular los caudales extremos (máximos y mínimos). Allí se plantea la existencia de un *embalse forestal*, para denotar la capacidad natural que tienen las cuencas hidrográficas de regular los caudales de los ríos a través de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera y la precipitación reciclada, las cuales dependen de la presencia de los bosques. Es decir que el bosque natural actúa como los embalses artificiales de agua, regulando los caudales extremos en las cuencas hidrográficas.

Colapso de la bomba biótica de humedad atmosférica

Los bosques han sido puestos en el centro de la dinámica de la circulación atmosférica regional y continental y en el transporte de humedad desde los océanos al interior de los continentes, a partir de la postulación de la teoría de la "bomba biótica de humedad atmosférica", según la cual la evaporación de los bosques y la subsecuente condensación del vapor de agua en la atmósfera constituyen los mecanismos que ponen en movimiento la circulación atmosférica que transporta humedad desde las regiones oceánicas hacia el interior de los continentes (Gorshkov y Makarieva, 2007; Makarieva *et al.*, 2009). La teoría de la circulación atmosférica inducida por la condensación provee una nueva manera de entender la formación de huracanes y tornados, y por qué la lluvia no decrece exponencialmente a medida que se adentra desde los océanos al interior de las regiones continentales con bosques. Análisis de la distribución de la lluvia a lo largo de las trayectorias de los ríos aéreos de Suramérica y la Amazonia confirman que la lluvia se incrementa de manera exponencial o se mantiene constante en zonas cubiertas por bosques (Poveda *et al.*, 2014; Molina *et al.*, 2019). La teoría de la bomba biótica de humedad atmosférica ha sido cuestionada por problemas teóricos que han sido refutados con argumentos teóricos y observacionales. El sano y necesario debate científico sigue abierto. Las consecuencias de la deforestación sobre el funcionamiento de la bomba biótica de humedad atmosférica son obvias. Colapsaría el transporte de humedad desde el océano Atlántico hacia la Amazonia o desde el océano Pacífico hacia el bosque de la región Darién-Chocó en el Pacífico colombiano, y por lo tanto disminuiría la precipitación reciclada en el continente (véase la sección Pérdida de la precipitación reciclada).

¿Cómo detener la deforestación?

Planteamos una serie de decisiones, estrategias y caminos que deben tomar los gobiernos y la sociedad para detener un proceso tan nefasto para la región, que atenta contra el logro de los ODS, e impide el avance de la bioeconomía como un nuevo paradigma de desarrollo económico.

Imponer el cumplimiento de la ley

Mucha deforestación en Colombia ocurre de manera ilegal, sin contar con licencias ambientales o en áreas protegidas. Para detener este proceso es urgente imponer el cumplimiento de la ley en dichas regiones.

Redefinir nuestra relación con la naturaleza y alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los humanos nos hemos convertido en asesinos ambientales en serie, con una particular crueldad nacida de nuestros hábitos de controlar y dominar el medio ambiente y a todos los demás seres vivos (Harari, 2014). Para corregir ese camino es necesario redefinir nuestra relación con la naturaleza. Es un imperativo ético urgente basado en la filosofía y la ética ambientales (Des Jardins, 2012), así como en la encíclica *Laudato si* del papa Francisco, y en múltiples evaluaciones y declaraciones de todas las grandes religiones del mundo (Yale University, 2020). Aún el lenguaje cuenta. Debemos dejar de hablar de "recursos naturales" cuando nos referimos a los seres vivos, al agua, al aire, a los suelos, a los bosques, a los páramos, a las sabanas, y a todos los demás biomas, así como a los océanos, a los peces, a los suelos, a la atmósfera. Son la *vida y sus sistemas de soporte*.

Pero también debemos ponernos a trabajar en forma decidida para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el 2030[1]. De ellos,

1 Puede consultarse en https://www.un.org/sustainabledevelopment/

Figura 18. Óleo sobre lienzo del maestro Juan Cristóbal Aguilar

el ODS 3 "Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades", aparece en el centro de los demás ODS porque la vida sana y el bienestar también dependen de nuestra relación con la naturaleza, tal como lo ha demostrado de manera dramática la pandemia de COVID-19. Para comenzar es necesario lograr el ODS 1 "Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo". La erradicación de la pobreza y el cambio climático son dos de los más grandes retos de nuestro tiempo, y ambos se retroalimentan mutuamente, como se pone en evidencia en Colombia (Malerba, 2020). Ese bienestar al que se refiere el ODS 3 también incluye al medio ambiente y a los demás seres vivos, y en particular los ODS 13 "Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos", 14 "Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible", y el 15 "Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e

invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad". Todos los ODS son importantes para la salud del planeta (Corvalan *et al.*, 2020). En Colombia, en particular, después del acuerdo de paz entre el Estado colombiano y las FARC, el Estado y la sociedad debemos firmar un acuerdo de paz por la naturaleza.

Adoptar la biotecnología como el motor de desarrollo socioeconómico y ambiental de Colombia

La recomendación central del grupo de Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente de la Misión de Sabios (vols. 1 y 2) es que Colombia debe cambiar su modelo de desarrollo basado en la explotación de recursos naturales sin valor agregado, en particular combustibles fósiles, por un modelo de producción bioeconómico basado en las biotecnologías, por las siguientes razones:

- La quema de combustibles fósiles es la principal causa del calentamiento global y de todos sus impactos sociales, ambientales, económicos y ecológicos. En el corto plazo serán sometidos a fuertes cargas impositivas, por el daño ambiental que causan. En caso contrario, seguiremos financiando nuestra autodestrucción.
- Tal modelo de desarrollo propicia la destrucción y contaminación de los ecosistemas y de los sistemas de soporte a la vida y la pérdida inexorable de la extraordinaria biodiversidad del país. La deforestación es la segunda causa más importante del cambio climático. La ampliación de las fronteras agrícola, ganadera y minera han propiciado la deforestación a gran escala de los bosques colombianos.
- El capital natural de Colombia constituye su mayor riqueza ambiental y económica. Su destrucción atenta contra el desarrollo sostenible presente y futuro del país en términos ambientales, sociales y económicos.
- El desarrollo de una bioeconomía potente tiene como requisito fundamental restaurar y conservar los ecosistemas del país, de tal manera que se garantice la supervivencia de nuestra extraordinaria

biodiversidad, sin la cual no es posible pensar en la bioeconomía como base del nuevo modelo de desarrollo sostenible y con equidad que demanda Colombia.

El hecho de preservar los bosques naturales no implica quedarnos de brazos cruzados frente a la belleza natural. Además de la bioeconomía, hay grandes posibilidades en el ecoturismo, el aviturismo dado que tenemos la mayor biodiversidad del mundo. También hay gran potencial en actividades de senderismo en todos los ecosistemas, y de balsaje y kayakismo en ríos de Colombia. Además, los páramos y los bosques tropicales están llenos de tesoros por descubrir, para el desarrollo de nuevos productos y patentes, fármacos, cosméticos, compuestos químicos, nuevas moléculas, colorantes, odorizantes, saborizantes, resinas, productos genéticos, productos derivados de la bioingeniería y de la biomimética, que deberán ser aprovechados en forma sostenible con alto valor agregado. Esta es la única y, tal vez, la última esperanza para que Colombia sea una potencia mundial económica, sin destruir sus ecosistemas.

Definir una meta nacional de deforestación cero ya y penalizar la deforestación

Colombia debe imponerse una meta de deforestación cero ya. Los compromisos hechos por Colombia en el Acuerdo de París y en otras instancias internacionales son muy tímidos y tardíos, arriesgando a perder para siempre ecosistemas y biodiversidad únicos e irremplazables. Una estrategia de colaboración público-privada puede aportar en esa dirección (Furumo y Lambin, 2020). También es urgente establecer sanciones penales, incluyendo cárcel, a quienes deforestan de manera ilícita y muy altos impuestos a los que lo hacen de manera lícita, para desincentivar dicha actividad. Además es necesario poner impuestos a la ganadería extensiva ineficiente y rentista de la tierra que propicia la deforestación. Y es esencial poner impuestos serios y permanentes a la quema de combustibles fósiles, algo que hace tiempo vienen recomendando todos los economistas serios y aun el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional.

Frenar la reforestación con monocultivos y restaurar los ecosistemas

La reforestación ha sido planteada como una estrategia en el combate contra el cambio climático y para proteger la biodiversidad. En abstracto eso es cierto, pero "el diablo está en los detalles". Es cierto que la reforestación contribuye a enfriar la temperatura del aire (Novick y Katul, 2020; Sidder, 2020), pero la reforestación casi siempre se refiere a monocultivos que acaban con la biodiversidad. Eso hace necesario comenzar por restaurar los ecosistemas degradados con vegetación natural variada, mediante el concepto de *rewilding*, o la restitución de los ecosistemas y la biodiversidad nativas (Perino *et al.*; Pettorelli *et al.*, 2019).

Implementar una ciencia y un sistema económico honestos con el medio ambiente

La deforestación y la degradación del medio ambiente suceden porque hay incentivos económicos para hacerlo. La economía tradicional no es honesta con el ambiente, y ya ha demostrado hasta la saciedad que fracasó en proveer bienestar y calidad de vida a la gran mayoría de la población del planeta (Piketty, 2019). Basar el crecimiento en la curva del PIB es un error profundo de base (Spash, 2020). La economía de mercado comete un grave error al valorar un bosque por el precio de su madera o por los réditos económicos que se obtienen al expandir la frontera agrícola o por una ineficiente ganadería extensiva. Debe reconocerse el verdadero valor de los ecosistemas con una política decidida de pago o compensación a las comunidades por la conservación de los servicios ecosistémicos de sus territorios. Eso exige una valoración y un pago o compensación acordes con la importancia de conservar los ecosistemas (Moros *et al.*, 2020). Esa valoración debe ser mayor que el costo de oportunidad de cualquier otra actividad extractiva o rentista de la tierra, más aún ante el enorme poder del dinero del narcotráfico. Lo que se ha hecho hasta ahora es nimio, y desincentiva a las comunidades a escoger ese camino. Hay otro error craso en la suposición de crecimiento económico infinito. En la década de 1960,

el economista K. Boulding planteaba que "quien crea que es posible un crecimiento infinito en un planeta finito, o es un loco o es un economista". Ya se ha demostrado la invalidez de ese postulado (Svartzman *et al.*, 2020). Solo cuando los políticos y los economistas admitan estos errores será posible cambiar la forma en la que se calcula el progreso (o retroceso) económico (Dasgupta, 2008). Para superar tales imperfecciones hay métricas como el indicador de progreso genuino o el producto ecosistémico bruto, que mide el valor monetario de los bienes y servicios ecosistémicos como la protección contra inundaciones o el suministro de agua limpia, vigente en China hace varios años. La revisión del proceso multilateral del Sistema de Cuentas Nacionales de las Naciones Unidas, agendada para el otoño del 2020, incluirá un debate sobre las métricas económicas adecuadas para integrar el bienestar y la sostenibilidad, la esperanza de vida, las emisiones de carbono y la educación. Esto es aún más urgente ante la crisis global originada por la pandemia de COVID-19, porque la salud económica depende directamente de la salud ecológica (Editorial Nature, 2020). Esa nueva economía (ciencia y sistema económico) ya están en marcha. Los beneficios exceden a los costos en varios órdenes de magnitud. Hay ejemplos como la Comisión Global sobre la Economía y el Clima[2], una iniciativa internacional para examinar cómo se puede lograr un buen desempeño económico y reducir los riesgos por el cambio climático. El Plan B para Salvar la Tierra también es sensato y factible (Brown, 2009), así como las recomendaciones de Barmes y Boait (2020) para abandonar el paradigma del crecimiento del PIB con el propósito de proteger el bienestar y evitar el desastre ecológico.

Avanzar en el desarrollo e implementación de la jurisprudencia ambiental

Vivir en condiciones dignas y en un medio ambiente sano es un derecho constitucional, además de ser parte fundamental de los ODS. Ante los problemas ecológicos, la degradación ambiental, la depredación del planeta,

2 Puede consultarse en http://newclimateeconomy.net/

la alteración traumática de los ecosistemas, el calentamiento global, el envenenamiento de aire, el agua, los suelos y los alimentos, se impone una nueva actitud ética de nuestra relación con la naturaleza. De allí ha surgido la jurisprudencia ambiental (Martin y Kennedy, 2015). El avance de esta disciplina en Colombia permite ser optimista. En abril del 2018, la Corte Suprema de Justicia reconoció a la Amazonia colombiana como "entidad 'sujeto de derechos', titular de la protección, de la conservación, mantenimiento y restauración a cargo del Estado y las entidades territoriales que la integran". La sentencia le ordenó al presidente y a las demás autoridades adoptar un plan de acción para proteger a la Amazonia colombiana. En el 2016 la Corte Constitucional había reconocido al río Atrato (Chocó) como una entidad sujeta de derechos, amparando los derechos fundamentales a la vida, a la salud, al agua, a la seguridad alimentaria, al medio ambiente sano, a la cultura y al territorio de las comunidades étnicas (negras e indígenas) que habitan la cuenca del río Atrato y sus afluentes, que vienen siendo víctimas de la explotación minera ilegal en el departamento de Chocó.

Otras decisiones de altas cortes y jueces han reconocido a varios ríos de Colombia como entidades sujetas de derechos, tales como los ríos Magdalena, Cauca, Combeima, Cocora, Coello, Otún y Pance, así como al Páramo de Pisba. Colombia ha avanzado en la creación de una jurisprudencia ambiental inteligente y pertinente, pero hasta ahora todo está en el papel. Los jueces y la sociedad civil deberán exigir el cumplimiento de las decisiones judiciales en los territorios.

Exigir a los gobernantes y a los decisores un compromiso serio para resolver las crisis ambiental y climática

Como ciudadanos tenemos el deber de elegir bien a nuestros representantes en los distintos organismos e instancias de los poderes ejecutivos y legislativos a nivel nacional, departamental y municipal. Esto incluye usar el voto como herramienta de presión para que se incorpore lo ambiental en la discusión y procesos políticos, pero es aún más necesario que les exijamos a los políticos y decisores que nos rindan cuentas sobre

los temas relevantes y urgentes. Esa presión ciudadana es fundamental. La participación de adolescentes y jóvenes en ese compromiso ciudadano ha sido admirable. Los adultos debemos estar avergonzados por no haber enfrentado de manera decidida este descomunal reto y descargar nuestra responsabilidad sobre los hombros de jóvenes y adolescentes como Greta Thunberg.

Tener presente que está en juego un tema de equidad intergeneracional

¿Qué planeta y qué mundo les vamos a dejar a nuestros descendientes? Cuando nos planteamos esa pregunta se consigue entender las crisis ambiental y climática como un tema de equidad intergeneracional (Taylor, 2013). Debemos enfocarnos en que nuestros descendientes vivan una vida digna con calidad y bienestar, y en armonía con la naturaleza, no como nuestra generación. Uno de los objetivos de las declaratorias de varios ríos como sujetos de derechos en Colombia no es solo proteger a la entidad natural "sino a las presentes y futuras generaciones de colombianos cuya existencia física, cultural y espiritual también depende del buen estado del río y de los recursos naturales en general", como dice la Corte Constitucional en relación con el río Atrato.

Involucrar el conocimiento ancestral en la discusión y en la pedagogía ambiental

Las comunidades indígenas de la región tropical de Suramérica han vivido en armonía con el medio ambiente por milenios. El conocimiento que han acumulado y transmitido a sus descendientes sobre el funcionamiento de los procesos naturales, ecosistémicos y ambientales es un acervo cultural muy importante, que debe ser aprovechado para contribuir a la solución de las crisis climática y ambiental, y para la enseñanza de las ciencias ambientales (Córdoba Vargas *et al.*, 2019).

Para citar algunos ejemplos, nos remitimos al trabajo de Hernández (2013) sobre la dinámica de las aguas y los peces en los ríos y los humedales

del centro de la Amazonia colombiana. Allí se consignan diversos gráficos sobre las transformaciones estacionales de los cuerpos de agua y de las orillas durante los ciclos hidrológicos anuales y estacionales, y las dinámicas de las distintas poblaciones de peces, con anotaciones sobre las relaciones con sus depredadores. Otro trabajo es el de Matapí y Yucuna (2012) sobre la cartografía ancestral yucuna-matapí.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y en especial a la Facultad de Minas y al Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, por el apoyo a mis investigaciones y a mi participación en la Misión Internacional de Sabios 2019. Agradezco el uso de los datos y la imaginería satelital de Global Forest Watch, así como de Lance Firms operados por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), Earth Science Data and Information System (ESDIS) con apoyo de NASA Headquarters. MAAP es un proyecto de la organización Amazon Conservation. También agradezco el uso de datos de satélite de la aplicación NASA Firms[3] operado por el proyecto NASA/Goddard Space Flight Center Earth Science Data and Information System (ESDIS).

Referencias

Aguiar, A. P. D., Vieira, I. C. G., Assis, T. O., Dalla-Nora, E. L., Toledo, P. M., Oliveira Santos-Junior, R. A., Batistella, M., Coelho, A.S., Savaget, E. K., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C. A. y Ometto, J. P. H. (2016). Land use change emission scenarios: Anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, 22, 1821-1840, doi:10.1111/gcb.13134

3 Puede consultarse en https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/

Armenteras, D., Schneider, L. y Dávalos, L. M. (2019). Fires in protected areas reveal unforeseen costs of Colombian peace. *Nature Ecology and Evolution*, 3(1), 20-23. doi:10.1038/s41559-018-0727-8

Avissar, R. y Werth, D. (2005). Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation. *Journal of Hydrometeorology*, 6, 134-145.

Badger, A. M. y Dirmeyer, P.A. (2016). Remote tropical and sub-tropical responses to Amazon deforestation. *The International Journal Climate Dynamics*, 46, 3057-3066. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2752-5

Baker, J. C. A. y Spracklen, D. V. (2019). Climate benefits of intact Amazon forests and the biophysical consequences of disturbance. *Frontiers in Forests and Global Change* 2, 47. doi: 10.3389/ffgc.2019.00047

Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R. J. W., Schöngart, J., Espinoza, J. C. y Pattnayak, K.C. (2018). Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*. https://doi.org/10.1126/sciad v.aat8785

Barmes, D. y Boait, F. (2020). *The Tragedy of Growth*. Positive Money. https://positivemoney.org/publications/tragedy-of-growth/

Bedoya-Soto, J. M., Poveda, G. y Sauchyn, D. (2018). New insights on land-atmosphere feedbacks over Tropical South America at interannual timescales, *Water*, 10(8), 1095. doi: 10.3390/w10081095

Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 1444-1449.

Brown, L. R. (2009). *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization*. W. W. Norton & Co.

Builes-Jaramillo, L. A., Marwan, N., Poveda, G., y Kurths, J. (2017). Nonlinear interactions between the Amazon River basin and the Tropical North Atlantic at interannual timescales. *Climate Dynamics*, 50(7-8), 2951-2969.

Builes-Jaramillo, L. A. y Poveda, G. (2018). Conjoint analysis of surface and atmospheric water balances in the Andes-Amazon system. *Water Resources Research*, 54, 5, 3472-3489.

Centro Nacional de Memoria Histórica (2016). *Tierras y conflictos rurales. Historia, políticas agrarias y protagonistas*. CNMH.

Centro Nacional de Memoria Histórica (2018). *Tierras. Balance de la contribución del* CNMH *al esclarecimiento histórico*. CNMH.

Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J. P., Forero-Medina, G., Ochoa, J., Pedraza, C., Schneider, L., Lora, C., Gómez, C., Linares, M., Hirashiki, C. y Biggs, D. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10(1) doi:10.1038/s41598-020-61861-y

Cohn, A. S., Bhattarai, N., Campolo, J., Crompton, O., Dralle, D., Duncan, J. y Thompson, S. (2019). Forest loss in Brazil increases maximum temperatures within 50 km. *Environmental Research Letters*, 14(8) doi:10.1088/1748-9326/ab31fb

Córdoba Vargas, C. A., Hortúa Romero, S. y León-Sicard, T. (2019). Resilience to climate variability: the role of perceptions and traditional knowledge in the Colombian Andes. *Journal Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(4), 419-445.

Corvalan, C., Lo, S. y Capon, A. (2020). Special Issue "Ten Years of Urgent Action: Global Environmental Threats to Health and the 2030 Agenda for Sustainable Development". *International Journal of Environmental Research and Public Health*. https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/global_environmental_threats

Costa, M. H., y Pires, G. F. (2010). Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*, 30 (13), 1970-1979.

Dasgupta, P. (2008). Creative Accounting. *Nature*, 456, 44.

Des Jardins, J. R. (2012). *Environmental Ethics*. 5.ª ed. Cengage Learning.

Dickinson, R. E. y Henderson-Sellers, A. (1988). Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parametrizations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114, 439-462. https://doi.org/10.1002/qj.49711448009

Editorial Nature. (2020). Embed nature in strategies to reboot economies. *Nature*, 581, 14th May, 119.

Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A. y Segura, H. (2019). Contrasting north-south changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981-2017). *Climate Dynamics*, 52(9), 5413-5430.

Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S. y Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia.

Agriculture, Ecosystems & Environment, 114 (2-4), 369-86. doi:10.1016/j.agee.2005.11.013
Finer, M. y Mamani, N. (2019). La deforestación impacta 4 áreas protegidas en la Amazonia colombiana. MAAP: 106. https://maaproject.org/2019/colombia_julio/
Finer, M., y Mamani, N. (2020). MAAP Síntesis 2019: *Hotspots* y tendencias de deforestación en la Amazonía. https://maaproject.org/2020/sintesis-2019/
Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. A., Dickinson, R. E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R. y Myneni, R. B. (2013). Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (45), 18110-18115.
Furumo, P. R. y Lambin, E. F. (2020). Scaling up zero-deforestation initiatives through public-private partnerships: A look inside post-conflict Colombia. *Global Environmental Change*, 62, doi:10.1016/j.gloenvcha.2020.102055
Gedney, N. y Valdés, P. J. (2000). The effect of Amazonian deforestation on the northern hemisphere circulation and climate. *Geophysical Research Letters*, 27(19), 3053-3056.
Gorshkov, V. G. y Makarieva, A. M. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1013-1033.
Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O. y Townshend, J. R. G. (2013). Hansen/UMD/Google/USGS/NASA Tree Cover Loss and Gain Area. University of Maryland, Google, USGS, and NASA. www.globalforestwatch.org.
Harari, Y. N. (2014). Sapiens: *A Brief History of Humankind*. Harvill Secker.
Henderson-Sellers, A., Dickinson, R. E., Durbidge, T. B., Kennedy, P. J., McGuffie, K. y Pitman, A. J. (1993). Tropical deforestation: Modeling local-to regional-scale climate change. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 98, 7289-7315. https://doi.org/10.1029/92JD02830
Hernández, E. (2013). Dinámica de las aguas y los peces de la cabecera a la bocana. Investigación de la gente de centro de la Amazonia colombiana. Proyecto Putumayo Tres Fronteras del Programa Trinacional. Tropenbos Internacional Colombia.

Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H. y Scheffer, M. (2011). Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science*, 334(6053), 232-235. https://doi.org/10.1126/science.1210657

Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., Zhang, L., Fan, G., Xu, J., Gu, X., Cheng, Z., Yu, T., Xia, J., Wei, Y., Wu, W., Xie, X., Yin, W., Li, H., Liu, M., Xiao, Y., Gao, H., Guo, L., Xie, J. Wang, G., Jiang, R., Gao, Z., Jin, Q., Wang, J. y Cao, B. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet*, 395, 10223, 497-506.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018). Boletín de Detección Temprana de Deforestación. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023856/

International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2020). Forests and climate change. https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/forests-and-climate-change

Johnson, C. K., Hitchens, P. L., Pandit, P. S., Rushmore, J., Evans, T. S., Young, C. C. W. y Doyle, M. M. (2020). Global shifts in mammalian population trends reveal key predictors of virus spillover risk. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287, 20192736. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2019.2736

Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J. C., Chávez, S., Sicart, J.-E. y T. Lebel (2018). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the Central Andes. *Climate Dynamics*. https://doi.org/10.1007/s00382- 017-858-8

Kumagai, T. O., Saitoh, T. M., Sato, Y., Takahashi, H., Manfroi, O. J., Morooka, T., Kuraji, K., Suzuki, M., Yasunari, T. y Komatsuf, H. (2005). Annual water balance and seasonality of evapotranspiration in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*,128(1-2), 81-92.

Lovejoy, T. E. y Nobre, C. A. (2018). Amazon tipping point. *Science Advances*, 4 (2), 2340.

Machado Cartagena, A. (2009). *La reforma rural: una deuda social y política*. Universidad Nacional de Colombia.

Magalhães, N. D., Evangelista, H., Condom, T., Rabatel, A. y Ginot, P. (2019). Amazonian biomass burning enhances tropical Andean

glaciers melting. *Scientific Reports*, 9, 16914. https://doi.org/10.1038/s41598-019-53284-1.
Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G. y Li, B. -L. (2009). Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological Complexity*, 6, 302-307.
Malerba, D. (2020). Poverty alleviation and local environmental degradation: An empirical analysis in Colombia. *World Development*, 127, 104776. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104776
Marengo, J. A., Nobre, C.A., Tomasella, J., Oyama, M. D., Sampaio, G., de Oliveira, R., Camargo, H., Alves, L. M. y Brown, I. F. (2008). The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21, 495-516. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1600.1
Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M. y Soares, W. R. (2018). Changes in climate and land use over the Amazon region: Current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6, 228.
Martin, P. y Kennedy, A. (eds.). (2015). *Implementing environmental law*. Edward Elgar Publishing.
Matapí, U. y Yucuna, R. (2012). Cartografía ancestral yucuna-matapí: conocimiento y manejo tradicional del territorio. Proyecto Cartografía cultural del noreste amazónico. Ministerio de Cultura, Patrimonio Natural- Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas en alianza con Tropenbos Internacional Colombia.
McGuffie, K., Henderson-Sellers, A., Zhang, H., Durbidge, T. y Pitman, A. (1995). Global climate sensitivity to tropical deforestation. *Global and Planetary Change*, 10(1), 97-128.
Molina, R. D., Salazar, J. F., Martínez, J. A., Villegas, J. C. y Arias, P. A. (2019). Forest-induced exponential growth of precipitation along climatological wind streamlines over the Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 2589-2599.
Monroy, D., Arias, J. E., Barón, O., Murcia, U. y Armenteras, D. (2019). Pressures on La Lindosa, Guaviare: Land-cover change and incidence of fires between 2012 and 2018. [Presiones ejercidas sobre la serranía de La Lindosa, Guaviare: Cambios de cobertura e incidencia de fuegos entre 2012 y 2018]. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 372-378. doi:10.15446/abc.v24n2.72435

Montini, T. L., Jones, C. y Carvalho, L. M. (2019). The South American low level jet: A new climatology, variability, and changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1200-1218.
Moraes-Arraut, J., Nobre, C. A., Barbosa, H. M. J., Obregón, G. y Marengo, J. (2012). Aerial rivers and lakes: looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. *Journal of Climate*, 25, 543-556. doi: 10.1175/2011JCLI4189.1
Moros, L., Corbera, E., Vélez, M. A. y Flechas, D. (2020). Pragmatic conservation: Discourses of payments for ecosystem services in Colombia. *Geoforum*, 108, 169-183. doi:10.1016/j.geoforum.2019.09.004
Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. B. y Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858 (2000). https://doi.org/10.1038/35002501
Nobre, C. A. (2019). To save Brazil's rainforest, boost its science. *Nature*, 574, 455. doi: 10.1038/d41586-019-03169-0.
Nobre, C. A., Obregón, G., Marengo, J., Fu, R. y Poveda, G. (2009). Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. En *Amazonia and Global Change*, AGU Geophysics Monograph Series. doi:10.1029/2008GM000720
Nobre, C. A., Sellers, P. J. y Shukla, J. (1991). Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, 4, 957-988.
Novick, K. A. y Katul, G. G. (2020). The duality of reforestation impacts on surface and air temperature. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125. https://doi.org/10.1029/2019JG005543
Oyama, M. D. y Nobre, C. A. (2003). A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America. *Geophysical Research Letters*, 30 (23), 2199.
Panwar, A., Renner, M. y Kleidon, A. (2020). Imprints of evaporation and vegetation type in diurnal temperature variations. *Hydrology and Earth System Sciences*. https://doi.org/10.5194/hess-2020-95, in review.
Perino, A., Pereira, H. M., Navarro, L. M. *et al.* (2020). Rewilding complex ecosystems. *Science*, 364 (6438), eaav5570. doi: 10.1126/science.aav5570.
Pettorelli, N., Durant, S. y Du Toit, J. (eds.). (2019). *Rewilding*. Cambridge University Press.
Piketty, T. (2019). *Capital e ideología*. Deusto.

Poveda, G. (2020). Manifiesto científico por el medio ambiente en Colombia. En *Misión de sabios: foco de bioeconomía, biotecnología y medio ambiente*, vol. 2 del Reporte de la Misión Internacional de Sabios 2019. Vicepresidencia de la República de Colombia; Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Poveda, G. y Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10 (10), 2690-2702.

Poveda, G., Álvarez, D. M. y Rueda, O. A. (2010). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36, 2233. doi:10.1007/s00382-010-0931-y

Poveda, G., Jaramillo, L. y Vallejo, L. F. (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50, 98-118, doi:10.1002/2013WR014087

Poveda, G., Nobre, C. A. y Espinoza, J. C. (2019). While denying science, Mr. Bolsonaro's policies are threatening ecosystem services in Amazonia and the sustainable development of South America. *Science*. https://science.sciencemag.org/content/365/6452/419/tab-e-letters

Rammig, A., Jupp, T., Thonicke, K., Tietjen, B., Heinke, J., Ostberg, S. *et al.* (2010). Estimating the risk of Amazonian forest dieback. *New Phytologist*, 187, 694-706. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03318.x

Reyes Posada, A. (2009). *Guerreros y campesinos. El despojo de la tierra en Colombia*. Norma.

Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A. y Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4

Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M. y Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, USA 108, 9899-9904.

Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S. y Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia

caused by pasture and soybean cropland expansion, *Geophysical Research Letters*, 34, L17709, doi:10.1029/2007GL030612.
Salati, E. (1987). The forest and the hydrological cycle. En J. H. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts, y R. L. Victoria (eds.), *Amazonian deforestation and climate* (pp. 273-296). John Wiley and Sons.
Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M., Rodríguez, E., Hoyos, I., Mercado-Bettín, D. y Poveda, G. (2018). Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a "forest reservoir". *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1735-1748. https://doi.org/10.5194/hess-22-1735-2018
Sheil, D. (2018). Forests, atmospheric water and an uncertain future: The new biology of the global water cycle. *Forest Ecosystems*, 5, 19. https://doi.org/10.1186/s40663-018-0138-y
Sheil, D., Bargués-Tobella, A., Ilstedt, U., Ibisch, P. L., Makarieva, A., McAlpine, C., Morris, C. E., Murdiyarso, D., Nobre, A. D., Poveda, G., Spracklen, D. V., Sullivan, C. A., Tuinenburg, O. A. y Van der Ent, R. J. (2019). Forest restoration: Transformative trees. *Science*, 366 (6463), 316-317.
Sidder, A. (2020). Reforestation as a local cooling mechanism. *Eos*, 101, https://doi.org/10.1029/2020EO142166
Sombroek, W. (2001). Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. *Ambio*, 30 (7), 388-396.
Soruco, A. *et al.* (2015). Impacts of glacier shrinkage on water resources of La Paz city, Bolivia (16 °S). *Annals of Glaciology*, 56 (70), 147-154.
Spash, C. L. (2020). 'The economy' as if people mattered: Revisiting critiques of economic growth in a time of crisis. *Globalizations*. doi: 10.1080/14747731.2020.1761612
Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C. y Dekker, S. C. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8, 539-543. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y
Staver, A. C., Archibald, S. y Levin, S. A. (2011). The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *Science*, 334(6053), 230-232.
Suárez, L., Asunción, M., Rivera, L., Pratesi, I., Galaverni, M. y Antonelli, M. (2020). *Pérdida de naturaleza y pandemias. Un planeta sano por la salud de la humanidad*. WWF España.

Svartzman, D., Ament, J., Barmes, D., Erickson, J. D., Farley, J., Guay-Boutet, C. y Kosoy, N. (2020). Money, interest rates and accumulation on a finite planet: Revisiting the "monetary growth imperative" through institutionalist approaches. En R. Costanza *et al*. (eds.), *Sustainable Wellbeing Futures: a Research and Action Agenda for Ecological Economics*, Edward Elgar Publisher.

Taylor, J. (2013). Intergenerational justice: A useful perspective for heritage conservation. CeROArt [Online], HS | 2013, Online since 30 October 2013, connection on 30 April 2020. http://journals.openedition.org/ceroart/3510; DOI: https://doi.org/10.4000/ceroart.3510

Trachte, K. (2018). Atmospheric moisture pathways to the highlands of the tropical Andes: Analyzing the effects of spectral nudging on different driving fields for regional climate modeling. *Atmosphere*, 9(11), 456.

Trisos, C. H., Merow, C. y Pigot, A. L. (2020). The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2189-9

Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R. y Gochis, D. (2006a). Toward a unified view of the American monsoon systems. *Journal of Climate*, 19, 4977-5000. doi: 10.1175/jcli3896.1

Vera, C., Báez, J., Douglas, M., Emmanuel, C. B., Marengo, J., Meitin, J. Nicolini, M., Nogues-Paegle, J., Paegle, J., Peñalba, O., Salio, P., Saulo, C., Silva Dias, M. A., Silva Dias, P. y Zipser, E. (2006b). The South American low-level jet experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 63-78, https://doi.org/10.1175/BAMS-87-1-63

Vizy, E. K. y Cook, K. H. (2007). Relationship between Amazon and high Andes rainfall. *Journal of Geophysical Research*, 112, D07107. https://doi.org/10.1029/2006jd007980

Von Randow, R. C. S., Rodríguez, D. A., Tomasella *et al.* (2019). Response of the river discharge in the Tocantins River Basin, Brazil, to environmental changes and the associated effects on the energy potential. *Regional Environmental Change*, 19 (1), 193-204.

Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N. y Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. Earth-*Science Reviews*, 176, 195-213.

Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T. y Kropp, J. P. (2018). Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 911-927.

World Wildlife Fund (WWF) Colombia (2020). ¿Qué es la biodiversidad? https://www.wwf.org.co/biodiversidad.cfm

Yale University. (2020). Climate change statements from world religions. https://fore.yale.edu/Climate-Emergency/Climate-Change-Statements-from-World-Religions

Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., Van der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., Sampaio, G. y Rammig, A. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 13 337-13 359, doi:10.5194/acp-14-13337-2014

Zemp, D. C., Schleussner, C. -F., Barbosa, H. M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L. y Rammig, A. (2017a). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, 8, 14681.

Zemp, D. C., Schleussner, C. -F., Barbosa, H. M. J. y Rammig, A. (2017b). Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, 44. doi:10.1002/2017GL072955

Zhang, H., Henderson-Sellers, A. y McGuffie, K. (1996). Impacts of tropical deforestation. Part II: The role of large-scale dynamics. *Journal of Climate*, 9(10), 2498-2521.

Zou, Y., Macau, N., Sampaio, G., Ramos, A. M. T. y Kurths, J. (2016). Do the recent severe droughts in the Amazonia have the same period of length? *Climate Dynamics*, 46, 3279-3285.

Diversidad microbiana:

desafíos y retos para la bioeconomía en Colombia

Sandra Baena Garzón

La hermosa metáfora de "el *árbol de la vida*" que se conoce desde Charles Darwin, el padre de la teoría evolutiva, muestra que todos los seres vivos estamos conectados a través de nuestros ancestros comunes, y este vínculo también se refleja en nuestra interdependencia para la sostenibilidad del planeta. Por supuesto, esto incluye a los microorganismos, aquellos organismos unicelulares microscópicos que muchas veces se asocian con enfermedades y pandemias, pero de su vasta diversidad, menos del 5 % es perjudicial para el resto de los seres vivos (Sikorski, 2015). Los microorganismos han sido fundamentales para abastecer de oxígeno a los océanos y la atmósfera, facilitando las condiciones que permitieron la evolución de organismos multicelulares (Reinold *et al.*, 2019). Además, por su ubicuidad, diversidad y principalmente por su papel dominante en los ciclos biogeoquímicos, el ciclaje de nutrientes y la degradación y transformación de los desechos contaminantes, estos organismos tienen un papel esencial en el mantenimiento de la vida sobre la tierra (Pace, 2018). En este contexto, valdría la pena preguntarse ¿Qué tienen que ver los microorganismos con la bioeconomía?

Si la bioeconomía busca la producción, la utilización y la conservación de los recursos biológicos para generar productos, procesos y servicios en todos los sectores económicos y en un contexto de economía sostenible (GBS, 2018), efectivamente esta tiene mucho que ver con los microorganismos. La humanidad enfrenta desafíos importantes como el acceso equitativo

a la alimentación, al abastecimiento de agua potable, a la atención médica, educación, energía y materias primas y al mismo tiempo enfrenta índices persistentes de pobreza y pérdida de tierras cultivables ocasionadas por el aumento del nivel del mar causado por el calentamiento global y la desertificación. Sobre estos desafíos se han construido los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (SDGs. United Nations, 2015) dentro de un plan de acción que busca satisfacer estas necesidades de manera sostenible. Ahora, los procesos biotecnológicos basados en el aprovechamiento de los microorganismos pueden contribuir de forma significativa al logro de estos ODS, como los relacionados con la salud y el bienestar, el agua limpia y el saneamiento, la energía asequible y no contaminante, la acción por el clima, entre otros. Como se verá más adelante, la bioeconomía desde la perspectiva de los ODS, también tiene una estrecha relación con los microorganismos por las interacciones de estos con todas las actividades humanas y con su papel en el sostenimiento de la biosfera.

El informe de la Misión Internacional de Sabios 2019 (Colombia hacia una sociedad del conocimiento, 2019) plantea tres grandes retos, y aquí vale la pena resaltar el primero: *Colombia biodiversa*. Este propone "identificar, conocer, documentar y aprovechar la diversidad cultural y natural del país para impulsar la bioeconomía y la economía creativa", para que el país cimiente su economía en el *conocimiento* de sus recursos biológicos e identifique productos y procesos de valor agregado para desarrollar un modelo económico sostenible que no dependa exclusivamente de la explotación de recursos no renovables y de productos agrícolas primarios. En este reto se identifica una clara oportunidad de aprovechamiento de la diversidad microbiana para contribuir con el desarrollo de la bioeconomía.

¿Cómo podría contribuir la diversidad microbiana? En las últimas décadas el papel de los microorganismos y sus interacciones ha tomado mayor fuerza desde una perspectiva ecológica: los microorganismos forman comunidades que habitan sobre y dentro de macroorganismos, animales y plantas, interactuando con sus hospederos para regular procesos metabólicos esenciales y constituyendo barreras dinámicas y ecofisiológicas que aumentan las funciones de barreras física y química y minimizan por ejemplo el ataque de patógenos. Este es el caso de la microbiota humana, ese

extenso conjunto de miles de millones de células microbianas simbióticas que alberga cada persona, y del microbioma humano que está formado por los genes que alojan estas células (Ursell, Metcalf, Parfrey y Knight, 2012). Además, las interacciones microbianas pueden involucrar un conjunto diverso de mecanismos, dependencias y propiedades dinámicas que generan productos útiles como antibióticos o vitaminas y procesos y servicios ecosistémicos como la descomposición de desechos (Pacheco y Segrè, 2019). Como bien menciona Timmis *et al.* (2019), en su llamado a la alfabetización de la sociedad sobre el papel de los microorganismos en la biosfera, las actividades de los microorganismos tienen efectos generalmente positivos en el funcionamiento de esta y, por lo tanto, en la salud y el bienestar de todo el mundo biológico.

El efecto positivo de los microorganismos se refleja en diferentes sectores, por ejemplo, en el sector agrícola, donde la asociación entre plantas y microorganismos facilita la adquisición de nutrientes esenciales como el nitrógeno, además son los microorganismos los únicos seres vivos capaces de capturar el nitrógeno de la atmósfera e incorporarlo en las cadenas tróficas. Sin esta acción microbiana no habría sido posible alcanzar la suficiente producción de biomasa vegetal (productores primarios) para la proliferación y evolución de los consumidores (animales). Asimismo, cuando los microorganismos están en interacción con las plantas contribuyen a la respuesta de defensa de estas contra patógenos y producen también moléculas denominadas *metabolitos secundarios* que son similares a las hormonas que promueven el crecimiento de las plantas Timmis *et al.* (2019). Estos metabolitos secundarios también pueden ser tóxicos para los animales, contribuyendo así con mecanismos de defensa de las plantas contra sus depredadores.

Dentro de los metabolitos secundarios más conocidos que son producidos por microorganismos se encuentran los antibióticos sintetizados por hongos y bacterias, los antioxidantes que tienen aplicaciones en salud humana y sirven también para preservar alimentos, entre otras muchas funciones, los biosurfactantes, útiles para la biorremediación de la contaminación producida por derrames de petróleo, los pigmentos usados en industria cosmética y de alimentos, entre otros.

Estos ejemplos muestran que los microorganismos han sido usados a lo largo de la historia humana para obtener beneficios de los procesos que ellos llevan a cabo y beneficio de las moléculas que producen. La producción de alimentos y bebidas se hace explotando los procesos metabólicos de diferentes tipos de microorganismos, basta pensar en productos como el vino, la cerveza o los productos lácteos fermentados. Pero además son usados para degradar desechos industriales y domésticos de forma eficiente y así también contribuir a la depuración de las aguas contaminadas.

El aprovechamiento de la diversidad microbiana para estos fines requiere entonces de un mayor conocimiento de los procesos metabólicos de los microorganismos y de la dependencia metabólica que gobierna las interacciones biológicas en los ecosistemas. Por ejemplo, la degradación de contaminantes orgánicos puede darse utilizando microorganismos anaerobios y el resultado final es la producción de gas metano, que es un gas de efecto invernadero, pero que, por otra parte, puede ser aprovechado para la generación de energía debido a su alto poder calorífico. El aprovechamiento del gas metano en sistemas controlados ha sido posible gracias al desarrollo de conocimiento cada vez más certero del metabolismo de las comunidades microbianas implicadas. Es el caso del reciente estudio de los investigadores del Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Dinamarca, donde utilizando estrategias metagenómicas y transcriptómicas identificaron comunidades microbianas desconocidas y dilucidaron su actividad metabólica (Zhu, 2020). Este estudio amplía el conocimiento sobre las interacciones y dependencias metabólicas microbianas en sistemas anaerobios, sobre las cuales recae la eficiencia de degradación de contaminantes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales; este nuevo conocimiento se traduce en la optimización y aumento de la eficiencia de dichos sistemas, con el consecuente beneficio para el medio ambiente y para todos los seres vivos.

Uno de los grandes desafíos que la humanidad afronta actualmente es el cambio climático, pero cuando se habla de su evaluación, no es usual pensar en los microorganismos. En septiembre del 2019, un grupo de destacados científicos publicó una declaración de consenso, en la que señalaban que era necesario incluir a los microorganismos y los procesos

microbianos dentro de las evaluaciones del cambio climático (Cavicchioli, 2019). Son los microorganismos los que mueven los ciclos biogeoquímicos de los elementos en los océanos y en los continentes y al desconocer la importancia de los procesos microbianos "se limita esencialmente la comprensión de la biosfera de la tierra y la respuesta al cambio climático y, por lo tanto, se ponen en peligro los esfuerzos para crear un futuro ambientalmente sostenible" (Marx, 2020). Cavicchioli *et al.* (2019) proponen construir observatorios oceánicos usando herramientas modernas de estudio de microorganismos (bacterias, arqueas, fitoplancton, zooplancton y hongos) para entender cómo estos afectan el clima y cómo el clima los afecta a ellos, para comprender esta dinámica de manera consistente y a largo plazo. Pero el alcance de estos observatorios va más allá, se busca también identificar si los microorganismos pueden contribuir a mitigar el cambio climático.

Un elemento importante para aprovechar la diversidad microbiana en la bioeconomía es la interacción entre científicos y empresarios para desarrollar emprendimientos basados en el conocimiento que impliquen aplicaciones que aporten soluciones a los grandes retos que afronta la humanidad y promuevan un cambio social y cultural dentro de un contexto de desarrollo sostenible. El desarrollo de emprendimientos basados en la explotación del potencial de los microorganismos requiere un largo camino, que pasa de la investigación básica en la que se produce el conocimiento, a pruebas de principio y de la investigación aplicada a pruebas de concepto en las que se define la factibilidad de un desarrollo tecnológico, que constituye la parte crucial, para continuar con una futura aplicación. Este proceso necesita un entorno favorable para la generación de conocimiento básico, para el fortalecimiento de laboratorios de investigación con tecnología de vanguardia, para la implementación de centros de desarrollo tecnológico, de unidades de I + D + i, de *start-ups* o *spin-off*, teniendo presente que el aprovechamiento de la biodiversidad no se hace de la noche a la mañana ni se traduce automáticamente en actividades comerciales: el aprovechamiento de la biodiversidad microbiana, como del resto de la biodiversidad en un contexto sostenible, precisa incentivos reales y sólidos de políticas nacionales de educación, de formación y desarrollo científico para convertir el conocimiento en motor de desarrollo hacia una bioeconomía sostenible.

Referencias

Cavicchioli, R. Ripple, W. J., Timmis, K. N., Azam, F., Bakken, L. R., Baylis, M., Behrenfeld, M. J., Boetius, A., Boyd, P. W., Classen, A. T. Crowther, T. W., Danovaro R., Foreman, C. M., Huisman, J., Hutchins, D.A., Jansson, J. K., Karl, D. M., Koskella, B., Mark Welch, D. B., Martiny, J. B. H., Moran, M. A., Orphan, V. J., Reay, D.S., Remais, J. V., Rich, V. I., Singh, B. K., Stein L. Y., Stewart, F. J., Sullivan, M. B., van Oppen, M. J. H., Scott, C. Weaver, S. C., Webb, E. A. y Webster, N. S. (2019). Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. *Nature Reviews Genetics*, 17, 569-586.

Colombia hacia una sociedad del conocimiento: Informe de la Misión Internacional de Sabios 2019 por la educación, la ciencia, la tecnología y la innovación. Propuestas de la Misión Internacional de Sabios, Colombia. (2019). Gobierno de Colombia. DOI: 10.13140/RG.2.2.34599.29609

Global Bioeconomy Summit Conference Report (GBS). (2018). Conference Report. Innovation in the Global Bioeconomy for Sustainable and Inclusive Transformation and Wellbeing. Office of the Bioeconomy Council c/o Biocom AG Lützowstrasse, (pp. 33-36). Berlín. https://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/GBS_2018_Report_web.pdf

Marx, V. (2020). When microbiologists plunge into the ocean. *Nature Methods*, 17, 133-136.

Pace, N. R. (2018). The small things can matter. *PLoS Biology*, 16 (8): e3000009. DOI: org/10.1371/journal.pbio.3000009

Pacheco, A. R. y Segrè, D. (2019). A multidimensional perspective on microbial Interactions. *FEMS Microbiology Letters*, 366. DOI: 10.1093/femsle/fnz125

Reinold, M., Wong, H. L., MacLeod, F. I., Meltzer, J., Thompson, A. y Burns, B. P. (2019). The vulnerability of microbial ecosystems in a changing climate: Potential Impact in Shark Bay. *Life*, 9, 71; DOI: 10.3390/life9030071

SDGS. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. https://www.unfpa.org/resources/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development

Sikorski, J. (2015). The prokaryote Biology of Soil. *Soil Organisms*, 87 (1), 1-28.

Ursell, L. K., Metcalf, J. L., Parfrey, L. W. y Knight, R. (2012). Defining the Human Microbiome. *Nutrition Review*, 70, S38-S44. DOI:10.1111/j.1753-4887.2012.00493.x

Timmis, K., Cavicchioli, R., García, J. L., Nogales, B., Chavarría, M., Stein, L., McGenity, T. J., Webster, N., Singh, B. K., Handelsman, J. *et al*. (2019). The urgent need for microbiology literacy in society. *Environmental Microbiology*, 21, 1513-1528.

Zhu, X., Campanaro, Treu, L., Seshadri, R., Ivanova, N., Kougias, P. G., Kyrpides, N. y Angelidaki, I. (2020). Metabolic dependencies govern microbial syntrophies during methanogenesis in an anaerobic digestion ecosystem. *Microbiome,* 8, 22 DOI: org/10.1186/s40168-019-0780-9

Aportes al desarrollo económico de Colombia:

biodiversidad marina, nuestro tesoro azul

Carmenza Duque Beltrán

Contexto y enfoque

Los océanos representan aproximadamente el 70 % de la superficie de la tierra con una inmensa cantidad de recursos aprovechables, pero es su biodiversidad (fauna, flora y microorganismos) la que los ha llevado a convertirse en objetivo de estudio prioritario de muchos investigadores científicos, quienes poco a poco han ido estableciendo desde la ciencia cómo estos pueden ser conocidos y aprovechados sustentablemente en bienes y servicios de los países. Por ejemplo, son fuente de muchas especies únicas, resultado de millones de años de evolución y de condiciones de vida muy diferentes a las que se encuentran en los territorios terrestres. La biota marina mundial (232 997 especies) reportada en el 2019 en el World Register of Marine Species[1], con 97 % de ellas verificadas (de acuerdo con el trabajo de los científicos, se añaden aproximadamente unas 2000 especies por año), ha vivido desde sus inicios bajo un amplio rango de presiones (desde 1 a 1000 atmósferas), en diferentes condiciones de luz (completa iluminación hasta zonas de oscuridad total), con amplios rangos de temperatura desde –1 °C hasta 350 °C y en zonas con exceso o con muy pocos nutrientes. Sin embargo, las cifras que se acaban de mencionar representan solo la biodiversidad marina conocida, una pequeña fracción de las especies existentes. Los variados cálculos usados para predecir la biota marina actualmente existente la colocan en valores entre el 91-99 % de lo hasta ahora reportado, es decir, en promedio los territorios marinos

1 Puede consultarse en https://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RegProcess.htm, http://www.marinespecies.org/ y https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-species.html

tendrían unos 2,2 millones de especies (Mora *et al*., 2011). Así, sin duda es inmenso el universo de conocimiento que aún se tiene por delante para explorar. Es también tan grande su importancia que actualmente se le dedica el objetivo de desarrollo sostenible 14, de la Agenda Mundial 2030 para el Desarrollo "Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos".

Es consenso entre los científicos que la importancia del estudio de las especies marinas (sin hacer referencia a aquellas que han sido fuente de alimento para el hombre, desde hace innumerables años), radica en que ellas tienen una extraordinaria habilidad para producir una inmensa cantidad de compuestos químicos comúnmente llamados "productos naturales marinos o compuestos naturales marinos", con estructuras químicas únicas, correlacionadas con importantes actividades biológicas que en muchos casos han servido de base para importantes desarrollos de drogas o con propiedades que han permitido la creación de productos útiles en la industria.

Aunque la historia de los compuestos químicos de origen marino (productos naturales marinos) aprovechables por el hombre empezó en el año 1600 a. C. con el descubrimiento y posterior comercialización por los fenicios del colorante púrpura tirio, solo fue hasta el siglo pasado cuando se empezaron a conocer compuestos como agar, carragenina, vitaminas A y D y ácidos grasos insaturados de algas y peces, iluminando por primera vez el camino potencial de mercados que inclusive en la actualidad se han convertido en pilares de la economía de algunos países desarrollados. Así, a manera de historia corta (Duque *et al*., 2018) contada desde mediados del siglo xx, vale la pena mencionar que fue a comienzos de la década de los cincuenta cuando la comunidad científica desveló a la espongouridina y la espongotimidina aisladas de la esponja del Caribe *Tethia cripta*, como sustancias con actividad biológica aprovechable, las cuales más tarde fueron transformadas químicamente en vidarabina y citarabina, respectivamente, y aprobadas, la primera como agente anticáncer en 1969 y la segunda como antiviral en 1976. En la década de los setenta, luego del hallazgo de las prostaglandinas, se inició la carrera científica formal hacia el descubrimiento de un buen número de medicinas y productos industriales de origen marino. Al mismo tiempo, el desarrollo de nuevas

técnicas de recolección de organismos y de novedosas técnicas de alta eficiencia y rapidez de análisis químico y actividad biológica, así como la aparición de las "ómicas" (genómica, proteómica, metabolómica, transcriptómica), las recientes aproximaciones de la minería genómica y el uso de la biología molecular y la biotecnología en el campo de la ingeniería, han permitido que hoy en día se disponga de aproximadamente 25.000 compuestos marinos de estructura novedosa y con muchas actividades biológicas con los cuales ha sido posible la obtención de nuevas drogas y compuestos industriales aprovechables. Entre los compuestos encontrados o derivados sintéticos inspirados en ellos se encuentra que una veintena ha sido convertida en los últimos setenta años en productos comerciales. Algunos ejemplos para destacar son los siguientes (Duque *et al*., 2018; Lindequist, 2016): citarabina (CytosarU™, Depocyt™), trabectedina (Yondelis™), tetrahidroisoquinolina, mesilato de eribulina (Halaven™), brentuximav vedotina (Adcetris™), plitidepsina (Aplidin™), drogas usadas en el tratamiento del cáncer; ziconotide (Prialt™) potente analgésico; mezclas de ésteres etílicos de ácidos grasos omega-3 (Lovaza™) usadas en tratamientos de hipertrigliceridemia; extractos crudos de plumas de mar (Resilience™) usadas en cremas cosméticas antiinflamatorias y antisolares; Taq polimerasa, proteína verde flouroscente (GFP por su sigla en inglés), el alcaloide tetrodotoxina, ácido okadaico, palitoxina, entre otros compuestos usados para investigación básica. A esta lista vale la pena agregar el inmenso número de compuestos que están en la cola (*pipe line* en inglés) pendientes de ser desarrollados que se encuentran en fase clínica, preclínica y fases más tempranas de desarrollo como drogas aún en los laboratorios de investigación y aquellos que se encuentran en numerosos desarrollos industriales para ser usados en casos de descontaminación, en agricultura (pesticidas, fungicidas, herbicidas, fertilizantes), entre otros.

Tesoro azul de Colombia

En los territorios marinos de Colombia representados principalmente por el mar Caribe y por el océano Pacífico, con 928 660 km^2 (44 % del territorio total), se registran 51 330 especies[2] (figura 1), mostrando al país como uno de los de mayor biodiversidad marina en Sudamérica.

Estas cifras y las investigaciones hechas en los organismos marinos de otras latitudes y reportadas en la literatura científica, como se menciona en la primera parte de este escrito, sirvieron de base para el inicio en Colombia de investigaciones teniendo como principal objetivo el aporte al conocimiento de la química de los organismos marinos del país y al desarrollo de productos que pudieran, con el tiempo, constituirse en la base de una infraestructura sólida que soporte la futura bioeconomía sostenible del país. Fue así como a mediados de la década de los ochenta el grupo pionero multidisciplinario denominado Estudio y Aprovechamiento de Productos Naturales Marinos y Frutas de Colombia, de la Universidad Nacional de Colombia, inicia trabajos en este tema.

A medida que se fueron realizando adelantos en esta línea de investigación se fue descubriendo el inmenso arsenal de compuestos químicos presentes en muchas de las especies del Caribe colombiano y las muchas maneras de utilizarlos sin olvidar la sostenibilidad ambiental. Cada día un nuevo adelanto, un nuevo compuesto (estructura química novedosa), una nueva actividad biológica detectada y un nuevo uso previsto, fueron haciendo posible la acumulación del conocimiento científico que sirve de base para proyectar estos compuestos naturales en un mundo comercial. De esta forma, se ha llegado al punto en el cual, así como nuestras zonas terrestres tienen a El Dorado como fuente de riqueza no renovable, nuestros mares tienen una fuente inigualable y renovable de biodiversidad, denominada hoy “el tesoro azul de Colombia”. La figura 2 muestra los posibles sectores

2 Puede consultarse en https://sibcolombia.net/biodiversidad-en-cifras-2019/; http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1087-biodiversidad-colombiana-numero-tener-en-cuenta

en los cuales pueden insertarse en Colombia los bioproductos que están obteniendo los investigadores colombianos y que están mostrando un gran potencial comercial, como sucede en países desarrollados en sectores tales como el médico y farmacéutico, el ambiental, el industrial, el de alimentos y nutrición, el de agricultura, en la investigación básica, moviendo cantidades del orden de varios miles de millones de dólares por sector.

Figura 1. Biodiversidad marina en Colombia
Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

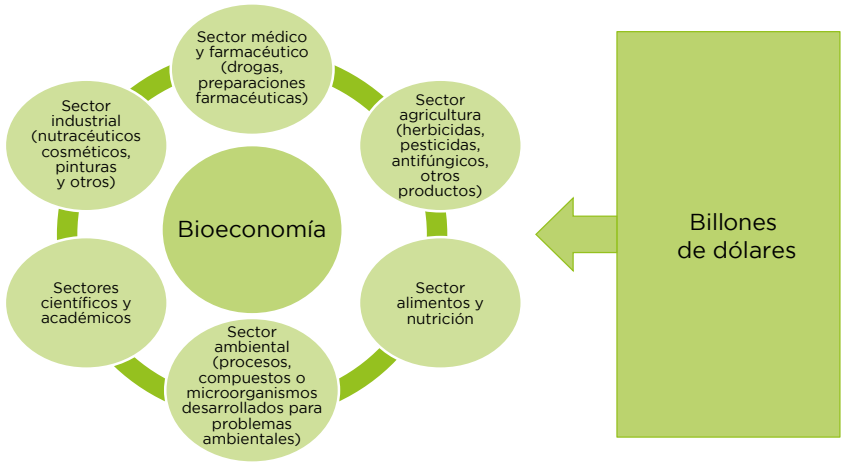


Figura 2. Sectores de aplicación de los productos naturales marinos
Fuente: elaboración propia

La metodología científica que poco a poco se fue construyendo desde el grupo de la Universidad Nacional de Colombia se presenta en la figura 3. Luego, esta fue adoptada por los grupos generados a partir del grupo madre de la Universidad Nacional de Colombia, en las universidades de Antioquia, Córdoba, Jorge Tadeo Lozano y La Sabana, para realizar la titánica tarea de estudiar, comprender y usar sosteniblemente el tesoro azul de Colombia para la conversión de los compuestos naturales marinos en bioproductos útiles en la economía colombiana. Hoy en día, estos cinco grupos de investigación, según el balance más reciente realizado (Bautista, 2017), han aislado e identificado 1560 compuestos naturales marinos particularmente a partir de algas, invertebrados marinos y microorganismos, 224 con estructura química novedosa y unos 20-30 con actividades biológicas que los colocarían en fases avanzadas de desarrollo, si se pudiera lograr en el país la sinergia resultante de alianzas con la industria farmacéutica o con otra clase de industrias, antes de su licenciamiento en la ruta de investigación mostrada en la figura 3. Una vez definida la estructura química de los compuestos y su posible uso medicinal o industrial en cualquier otro de los sectores mencionados, deben seguirse los procesos de obtención de estos bioproductos en laboratorio, planta piloto y a nivel industrial o biotecnológico, previa definición de la materia prima que se va a usar para garantizar la producción de manera sostenible y sustentable. En caso de producción de medicamentos, habrá que seguir también los procesos de experimentación en animales y en humanos. Además, es necesario establecer la propiedad intelectual del proceso o del bioproducto. Por último, el bioproducto quedará listo para su comercialización y venta.

En cuanto a recurso humano formado, son innumerables los estudiantes de pregrado, maestría y doctorado que recibieron y están recibiendo su formación en este campo. También, es importante considerar la infraestructura física establecida, instrumentación sofisticada y laboratorios, luego del camino recorrido.

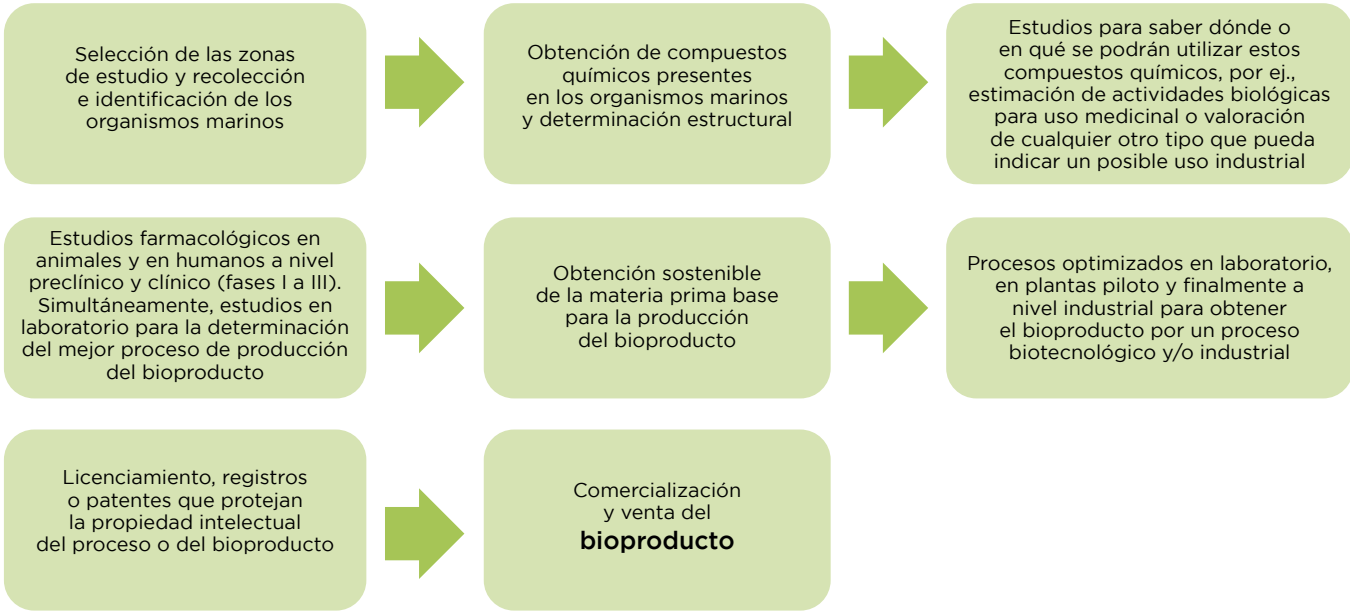


Figura 3. Ruta de investigación en productos naturales marinos en Colombia, hacia una bioeconomía sostenible
Fuente: elaboración propia

Bioproductos con mayor proyección como soportes en bioeconomía en el país

A continuación, se mencionan algunos de los casos más relevantes que involucran bioproductos marinos obtenidos por los grupos de investigación colombianos en los últimos treinta años.

En el sector médico y farmacéutico

Los estudios en Colombia hechos por el grupo de la Universidad Nacional de Colombia han mostrado que la mayoría de los compuestos bioactivos marinos obtenidos han tenido como fuente principalmente a los corales y a las esponjas. El octocoral *Antillogorgia elisabethae*, que crece en el archipiélago de San Andrés y Providencia, ha sido una fuente muy apreciada de diterpenos tipo pseudopterosinas y *seco*-pseudopterosinas (figura 4, compuestos 1-10), con actividades antiinflamatoria, citotóxica y antimicrobiana (Duque *et al*., 2004; Correa *et al*., 2009; Correa *et al*., 2011a). Las PsG, PsK, PsP, PsQ, PsS, PsT, PsU y *seco*-PsK tienen acción más potente que la indometacina, droga comercial comúnmente usada para tratar la inflamación. En cuanto a la citotoxicidad, los compuestos PsG, PsP, PsQ, PsS, PsT, PsU, 3-O-acetil-PsU y *seco*-PsK mostraron actividad moderada y no selectiva contra células humanas cancerígenas, y las PsG, PsU, PsQ, PsS y *seco*-PsK mostraron actividad antimicrobiana selectiva contra bacterias gram-positivas con una potencia comparable con la conocida droga de referencia vancomicina. Teniendo en cuenta estos resultados y para avanzar en el desarrollo de bioproductos, se iniciaron las investigaciones para la obtención en forma sostenible de estos compuestos usando la síntesis química. Sin embargo, pronto se abandonó esa posibilidad debido a la complejidad de las estructuras químicas de estos compuestos y a que las vías conocidas para hacerlo no eran económicamente rentables. Siguiendo

con la línea de este trabajo, los investigadores propusieron la hipótesis de que estos compuestos pudieran estar siendo producidos por los simbiontes del octocoral. Con estas ideas en mente se avanzó en la búsqueda de las bacterias simbiontes cultivables y su posterior incubación e identificación de sus productos metabólicos (Correa *et al*., 2011b). Infortunadamente, entre los productos de incubación de estas bacterias no se logró la detección de las pseudopterosinas ni de las *seco*-pseudopterosinas. Así, a pesar de los esfuerzos, aún no se ha podido llegar a la selección de una síntesis química viable, o en su defecto la del farmacóforo involucrado en su acción biológica. La búsqueda hoy en día continúa con la esperanza de posibilitar el uso en un futuro de estos nuevos compuestos en medicamentos o en cremas cosméticas con propiedades antiinflamatorias y antimicrobianas. Recientemente, se reportó en Canadá el uso de estas sustancias como anticancerígenas (Sperlich *et al*., 2017).

Un segundo caso que vale la pena mencionar son los estudios hechos también por el grupo de la Universidad Nacional en el compuesto (+)-discodérmolido (figura 4, compuesto 11) aislado por primera vez en 1990, por el Harbor Branch Oceanographic Institute (HBOI) de la esponja del Caribe *Discodermia dissoluta* en la isla Gran Bahama. Este compuesto fue licenciado a la empresa Novartis Pharma y protegido en 1998 con la patente US 5840.750 para su uso como medicamento anticancerígeno en pacientes humanos que sufren de tumores sólidos. Luego del descubrimiento de la presencia de la esponja a 10 m de profundidad en la zona de Santa Marta, los investigadores de la Universidad Nacional, Invemar y HBOI idearon el cultivo de este organismo en la bahía de Santa Marta como una posible fuente sustentable del compuesto activo (Ruiz *et al*., 2013). Aunque sus resultados fueron sorprendentes, las esponjas cultivadas crecieron y aumentaron la tasa de producción del discodermólido, esta producción no fue lo suficientemente alta para sustentar su producción comercial. Los trabajos continúan, esta vez ensayando cultivos celulares que permitan aumentar su producción.

Otro caso importante de bioprospección de productos naturales marinos en el país ha sido el aislamiento de diterpenos de tipo dolabellano (figura 4, compuestos 12-19) de algunos octocorales del género *Eunicea*.

Estudios hechos en la Universidad Nacional de Colombia permitieron obtener derivados semisintéticos de este tipo de compuestos y establecer su actividad (de naturales y semisintéticos) contra los virus zika (ZIKV) y chikunguña (CHIKV) (Amaya, 2016). En general, se encontró que la adición de grupos oxigenados contribuyó a mejorar la bioactividad de los diterpenos de dolabellano y dolastano de la replicación de ZIKV y CHIKV. El compuesto 13 mostró una CE50 = 0,92 ± 0,08 y SI = 814 contra ZIKV, mientras que el compuesto 17 mostró una CE50 = 0,71 ± 0,03 y SI = 1464 contra CHIKV. Lo que los hace excelentes candidatos para continuar con los estudios *in vivo*. También se han desarrollado estudios de estos compuestos contra el-VIH-1 (Pardo *et al*., 2014) y se ha encontrado que la oxidación sobre los compuestos naturales puede llevar una mejora significativa en la potencia anti-VIH-1 (de hasta 100 veces), siendo los compuestos 18 y 19 los más activos. Sus altas actividades antivirales, junto con su baja citotoxicidad, los hacen compuestos antivirales muy valiosos que vale la pena desarrollar en el país en el sector salud.

Las esponjas del Golfo de Urabá han sido los organismos más estudiados por el grupo de la Universidad de Antioquia[3] (Martínez, 2020), de ellas se han aislado importantes sustancias que pueden ser usadas como futuros medicamentos en enfermedades tales como la leishmaniasis y la tuberculosis. Sin embargo, como sucede en casi todos los casos de aprovechamiento de la biodiversidad, se hizo necesaria su obtención sustentable usando derivados *vía* síntesis química para obtener cantidades a mayor escala que han permitido continuar con los estudios de prospección y su posterior conversión en otros derivados con mayor o con diferente actividad a la reportada inicialmente. Es el caso del T5 epidioxi-esterol-ANB (sintetizado a partir de un epidioxisterol), y de otros derivados que presentaron importantes actividades anticancerígena, antiparasitaria y antituberculosa. También se han obtenido compuestos halogenados con resultados interesantes en cuanto a su actividad antiparasitaria. Estos estudios han llevado a desarrollar métodos de síntesis química para obtener derivados de la uridina, en mayores cantidades de lo que se encuentra en las fuentes

3 A. Martínez (2020, comunicación personal).

naturales y para preparar nuevos derivados con actividades patentadas para ser usadas contra diferentes tipos de cáncer. Algunas de estas sustancias se están evaluando en cuanto a sus procesos de interacción con modelos de membranas, con el fin de conocer más sobre su potencial biomédico. Asimismo, es importante mencionar que se han realizado varios trabajos con sustancias con potencial antileucémico obtenidas de macroalgas colombianas. Algunos de los estudios también en este grupo, muestran que las microalgas son fuente importante de sustancias útiles para la elaboración potencial de cosméticos antienvejecimiento. Esto sugiere la necesidad de más estudios para el cultivo y aprovechamiento racional de esta fuente tan interesante de sustancias útiles para el desarrollo de nuevos productos.

En el sector de alimentos y nutrición

Los estudios en macroalgas que crecen en el Caribe colombiano realizados de manera independiente por los grupos de la Universidad de Antioquia y de la Universidad Jorge Tadeo Lozano han aportado el soporte científico necesario para que estas puedan ser consideradas fuente de alimentos de alto contenido nutricional y transformadas en productos nutracéuticos debido a su contenido de ácidos grasos poliinsaturados y sustancias antioxidantes, en muchos casos, en mayor cantidad a la reportada en especies similares de otras latitudes. El grupo de la Universidad Jorge Tadeo Lozano ha incursionado en el aislamiento e identificación a partir del alga roja *Hypnea musciformis* de dos sustancias tipo polifenólico ((-) epicatequina y floretina) (Rozo *et al*., 2019) cuyo potencial para prevenir el daño oxidativo de proteínas de baja densidad humanas hacen que esta fuente vegetal marina pueda ser considerada excelente candidata para la fabricación de alimentos funcionales.

En el sector agrícola

Las enfermedades generadas por agentes fitopatógenos han sido catalogadas como uno de los principales problemas en la producción agrícola. Para controlar los efectos que pueden generan estas enfermedades, los

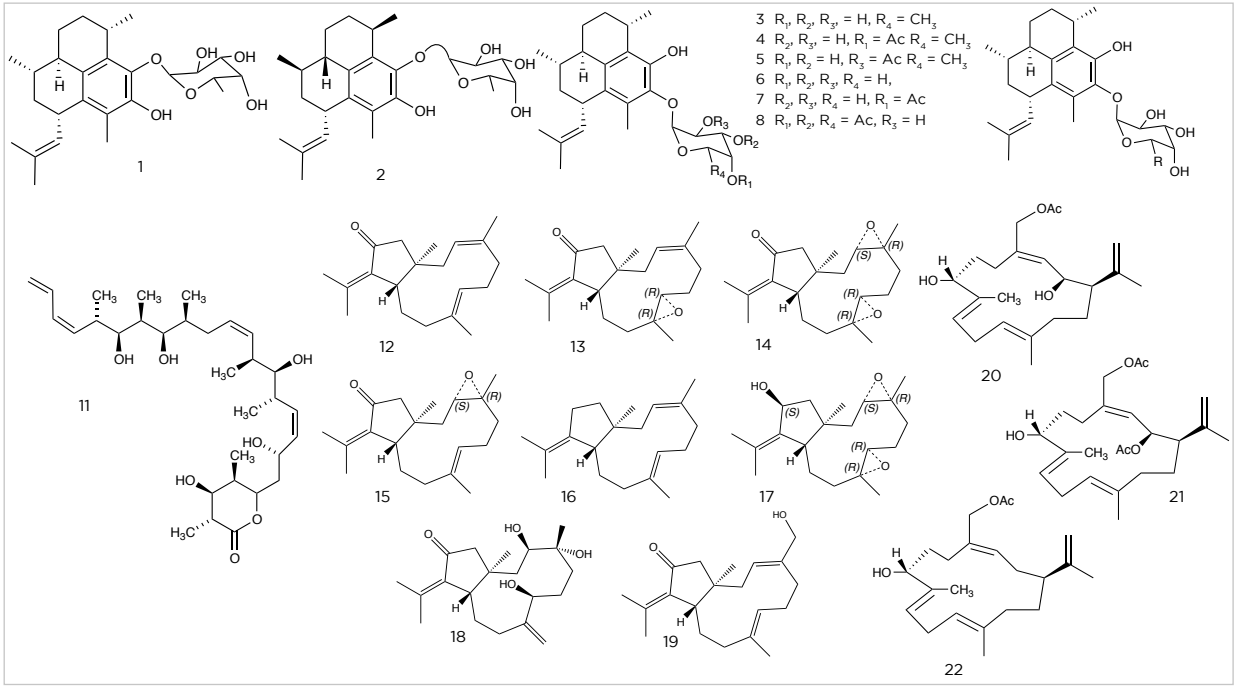
agricultores han optado por el uso indiscriminado de plaguicidas, lo que ha generado resistencia en los microorganismos patógenos y contaminación en el ambiente. Por esta razón, se han implementado estrategias que busquen disminuir las pérdidas causadas por los fitopatógenos y a su vez reduzcan el impacto en el ambiente. Una de estas aproximaciones es el uso de microorganismos que puedan actuar como controladores del patógeno, disminuyendo así el impacto que puede generar el uso de los plaguicidas.

En la búsqueda de agentes útiles de biocontrol, el grupo de la Universidad Nacional usando 24 actinobacterias de su colección de microorganismos marinos aislados del Caribe colombiano demostró que estas bacterias son una fuente excelente de actividad antimicrobiana contra *Burkholderia glumae*, *B. gladioli* y *B. plantarii*, bacterias fitopatógenas aisladas de cultivos de arroz, contra los hongos *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* (cepa patógena de clavel), contra *Colletotrichum gloeosporioides* (cepa patógena del ñame), y muy buena actividad *quorum quenching* empleando el biosensor *Chromobacterium violaceum* ATCC 31532 (Amaya *et al*., 2017). Continuando con los estudios, los autores lograron integrar la información taxonómica, la bioactividad y el perfil metabólico HPLC-MS de los extractos de las actinobacterias mencionadas, particularmente a partir de *Streptomyces* spp. (Betancur *et al*., 2019) para aislar dos nuevos ciclotetrapéptidos activos denominados Provipéptidos A y B, *ciclo*-(*L*-Pro-*L*-Leu-D-Pro-L-Phe) y *ciclo*-(-Pro-Ile-Pro-Phe), respectivamente y cinco cetopiperacinas conocidas como urauchimicina, deisovalerilblastimicina, antimicina A6a, 2-metil-*N*-(2'-feniletil)-butanamida y la 3-metil-*N*-(2'-feniletil)-butanamida, compuestos que mostraron también excelente actividad contra las plagas agrícolas mencionadas. Estos bioproductos están listos para ser usados en el desarrollo de procesos de base biotecnológica aplicando bien el microorganismo fuente de ellos o los compuestos mismos directamente en el control de plagas agrícolas. Los dos ciclopéptidos fueron también inhibitorios de *C. gloeosporioides* (patógeno del ñame) a concentraciones de 1,1 mM. Además, se encontraron cuatro nuevos compuestos denominados lilacininas A-D aislados del hongo marino *Purpureocillium lilacinum* PNM-67, con actividad contra las mencionadas bacterias patógenas del arroz.

Finalmente, vale la pena mencionar que la *kappa* carragenina extraída de algunas macroalgas del Caribe colombiano (Santamaría *et al*., 2019), podrá ser usada según los estudios del grupo de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, en la preparación de hidrogeles base para la elaboración de materiales encapsulantes de fertilizantes, los cuales permiten un flujo controlado de nutrientes N, P, K en cultivos comerciales tales como el de la papa criolla.

En el sector industrial

Respecto a los estudios realizados también en octocorales, particularmente en *Eunicea knighti* y *Pseudoplexaura flagellosa*, los investigadores del grupo de la Universidad Nacional, buscando compuestos con propiedades *anti-fouling* (antibioincrustantes), lograron el aislamiento y la determinación estructural completa de 16 diterpenos naturales tipo cembrano (Tello *et al*., 2013; Duque *et al*., 2018). Paso seguido, en investigaciones posteriores, con los compuestos naturales y cerca de 40 compuestos hemisintéticos preparados en el laboratorio con base en la estructura de los naturales aislados, se hizo un estudio de relación estructura química-actividad *anti-fouling*, que permitió la selección de los compuestos más activos (20, 21 y 22) mostrados en la figura 4, los cuales representan futuros bioproductos con un inmenso potencial en la preparación de pinturas industriales que podrán usarse en la protección de superficies sumergidas. Por otro lado, también gracias a las investigaciones en algas del Caribe colombiano en el grupo de la Universidad Jorge Tadeo Lozano en trabajo conjunto con la Universidad de La Sabana, se pudo seleccionar el alga roja *Hynea musciformis*, como fuente valiosa de *kappa* carragenina, la cual fue luego convertida en aditivo de alimentos mejorando la respuesta inmune y el crecimiento de tilapia en cultivos comerciales (Villamil *et al*., 2018). En cuanto a las microalgas, los investigadores de la Universidad de Antioquia han demostrado que estas son una fuente importante de sustancias útiles para la elaboración de cosméticos antienvejecimiento.



Conclusiones

La riqueza de la biota marina presente en los territorios marinos de Colombia es asombrosa, diversa, abundante en compuestos químicos con estructuras únicas reportadas por nuestros investigadores y actividades biológicas que iluminan un inmenso número de aplicaciones. Los casos presentados son una pequeña muestra de lo que se ha venido haciendo en el intento de originar bioproductos que pueden ser usados luego de su producción sustentable en un gran número de sectores comerciales. El país tiene en las ciencias de conocimiento y uso sustentable de la biodiversidad marina la columna vertebral que puede dar soporte a la línea de bioeconomía que se ha propuesto desde la Misión Internacional de Sabios 2019 y desde el Plan de desarrollo 2019-2022.

Figura 4. Estructuras químicas de algunos de los compuestos marinos aislados en Colombia con mayor potencial de aprovechamiento sustentable
Fuente: elaboración propia

Referencias

Amaya García, F. A. (2016). *Obtención de diterpenos marinos con posible actividad antiviral incrementada* [tesis de Maestría en Ciencias-Química]. Universidad Nacional de Colombia.

Amaya García, F., Sánchez Núñez, M. L., Ramos, F. A., Puyana, M., Nunes de Palmer Paixão, I. C., Teixeira, V. L. y Castellanos, L. (2017). Dolabellane diterpenes from the Caribbean soft corals *Eunicea laciniata* and *Eunicea asperula* and determination of their anti HSV-1 activity. *Revista Colombiana de Química*, *46* (1), 5. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62830

Bautista, C. A. (2017). *Una mirada al estado* actual *de la investigación en productos naturales marinos de Colombia* [tesis de Maestría en Ciencias-Química]. Universidad Nacional de Colombia.

Betancur, L. A., Forero, A. M., Romero-Otero, A., Sepúlveda, L. Y., Moreno-Sarmiento, N. C., Castellanos, L. y Ramos, F. A. (2019). Cyclic tetrapeptides from the marine strain *Streptomyces* sp. PNM-161a with activity against rice and yam phytopathogens. *The Journal of Antibiotics (Tokyo)*, 1. https://doi.org/10.1038/s41429-019-0201-0

Correa, F., Aristizábal, C., Duque, C. y Kerr, R. (2011a). Cytotoxic and Antimicrobial Activity of Pseudopterosins and seco-Pseudopterosins Isolated from the octocoral Pseudopterogorgia elisabethae of San Andrés and Providencia Islands (Southwest Caribbean Sea). *Marine Drugs*, *9*, 334-344. DOI: 10.3390/md9030334

Correa, H., Berrué, F., Haltli, B., Duque, C. y Kerr, R. (2011b). Rápida construcción de una librería de los productos de cultivo de 14 bacterias del phylum Firmicutes simbiontes del octocoral *Pseudopterogorgia elisabethae* de la isla de Providencia (Caribe Sur-Occidental). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35 (136), 277-288.

Correa, H., Valenzuela, A. L., Ospina, L. F. y Duque, C. (2009). Anti-inflammatory effects of the gorgonian *Pseudopterogorgia elisabethae* collected at the Islands of Providencia and San Andrés (SW Caribbean). *Journal of Inflammation*, *6* (5). DOI: 10.1186/1476-9255-6-5

Duque, C., Puyana, M., Narváez, G., Paz, A., Osorno, O., Asai, T., Hara, N. y Fujimoto, Y. (2004). Pseudopterosins P–V, new compounds from the

gorgonian octocoral Pseudopterogorgia elisabethae from Providencia island, Colombian Caribbean. *Tetrahedron*, 60, 10627-10635.
Duque, C., Tello, E. y Castellanos, L. (2018). An approach to structure-activity relationship applied to bioactive natural and synthetic analogues as a strategy to increase the activity of compounds isolated from octocorals. En C. Duque y E. Tello (eds.), *Corals in a changing world*. Intech Open Science/open minds. DOI: 10.5772/intechopen.74686
Lindequist, U. (2016). Marine derived pharmaceuticals. Challenges and opportunities. *Biomolecules & Therapeutics*, *24* (6), 561-571. DOI: 10.4062/biomolther.2016.181
Mora, C., Tittensor, D. P., Adl, S., Simpson, A. G. B. y Worm, B. (2011). How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biology*, *9* (8), e1001127. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3160336/
Pardo-Vargas, A., Ramos, F. A., Cirne-Santos, C. C., Stephens, P. R., Paixão, I. C. P., Teixeira, V. L. y Castellanos, L. (2014). Semi-synthesis of oxygenated dolabellane diterpenes with highly in vitro anti-HIV-1 activity. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, *24* (18), 4381-4383. https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2014.08.019
Rozo, G., Rozo, C., Puyana, M., Ramos, F. A. y Almonacid, C. (2019). Two compounds of the colombian algae Hypnea musciformis prevent oxidative damage in human low density lipoproteins LDLs. *The Journal of Functional Foods*, 60, 103399. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.06.001
Ruiz, C., Valderrama, K., Zea, S. y Castellanos, L. (2013). Mariculture and Natural Production of the Antitumoural (+)-Discodermolide by the Caribbean Marine Sponge *Discodermia dissoluta*. *Marine Biotechnology*, *15* (5). https://doi.org/10.1007/s10126-013-9510-7
Santamaría, J., Rozo, G. y Barreto, B. (2019). Characterization of κ-carrageenan hydrogel and its evaluation as a coating material for fertilizers. *The Journal of Polymers and the Environment*. https://doi.org/10.1007/s10924-019-01384-4
Sperlich, J., Kerr, R. y Teusch, N. (2017). The Marine Natural Product Pseudopterosin Blocks Cytokine Release of Triple-Negative Breast Cancer and Monocytic Leukemia Cells by Inhibiting NF-κB Signaling. *Marine Drugs*, *15*, 262. DOI: 10.3390/md15090262

Tello, E., Castellanos, L. y Duque, C. (2013). Synthesis of cembranoid analogues and evaluation of their potential as quorum sensing inhibitors. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 21, 242-256. DOI: 10.1016/j.bmc.2012.10.022

Villamil, L., Infante Villamil, S., Rozo, G. y Rojas, J. (2018). Effect of dietary administration of kappa carrageenan extracted from *Hypnea musciformis* on innate immune response, growth, and survival of Nile tilapie. *Aquaculture International*, 27, 53-62. https://doi. Org/10.1007//s10499-018-0306-7

Biotecnología y agricultura

Silvia Restrepo Restrepo

La bioeconomía se refiere a la producción, utilización y conservación de los recursos biológicos. Esto incluye el conocimiento relacionado, ciencia, tecnología e innovación, para proveer información, productos, procesos y servicios transversalmente a todos los sectores económicos, propendiendo a una economía sostenible (Global Bioeconomy Summit Communiqué, 2018). Involucra, entonces, una muy amplia gama de usos y aplicaciones de los recursos biológicos, a los cuales se adiciona valor mediante el conocimiento y la tecnología.

Como parte del modelo bioeconómico se pueden identificar opciones productivas con bajo impacto ambiental, las cuales suponen una producción mayor con menores insumos (proyecto Alcue-KBBE, Knowledge Based Bio Economy; Trigo *et al*., 2013). Estas opciones son: (1) valorización de los recursos de biodiversidad, (2) ecointensificación, (3) servicios ecosistémicos, (4) eficiencia de las cadenas de valor, (5) biorrefinerías y bioproductos, y (6) aplicaciones de la biotecnología.

La figura 1 compendia diferentes vías de la bioeconomía para la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales y algunas de sus interacciones.

En este capítulo nos centraremos en la biotecnología como un elemento dinamizador que promueve el desarrollo de la bioeconomía. La biotecnología no es la única tecnología necesaria para la bioeconomía, las "tecnologías convergentes" describen la combinación de cuatro áreas del conocimiento:

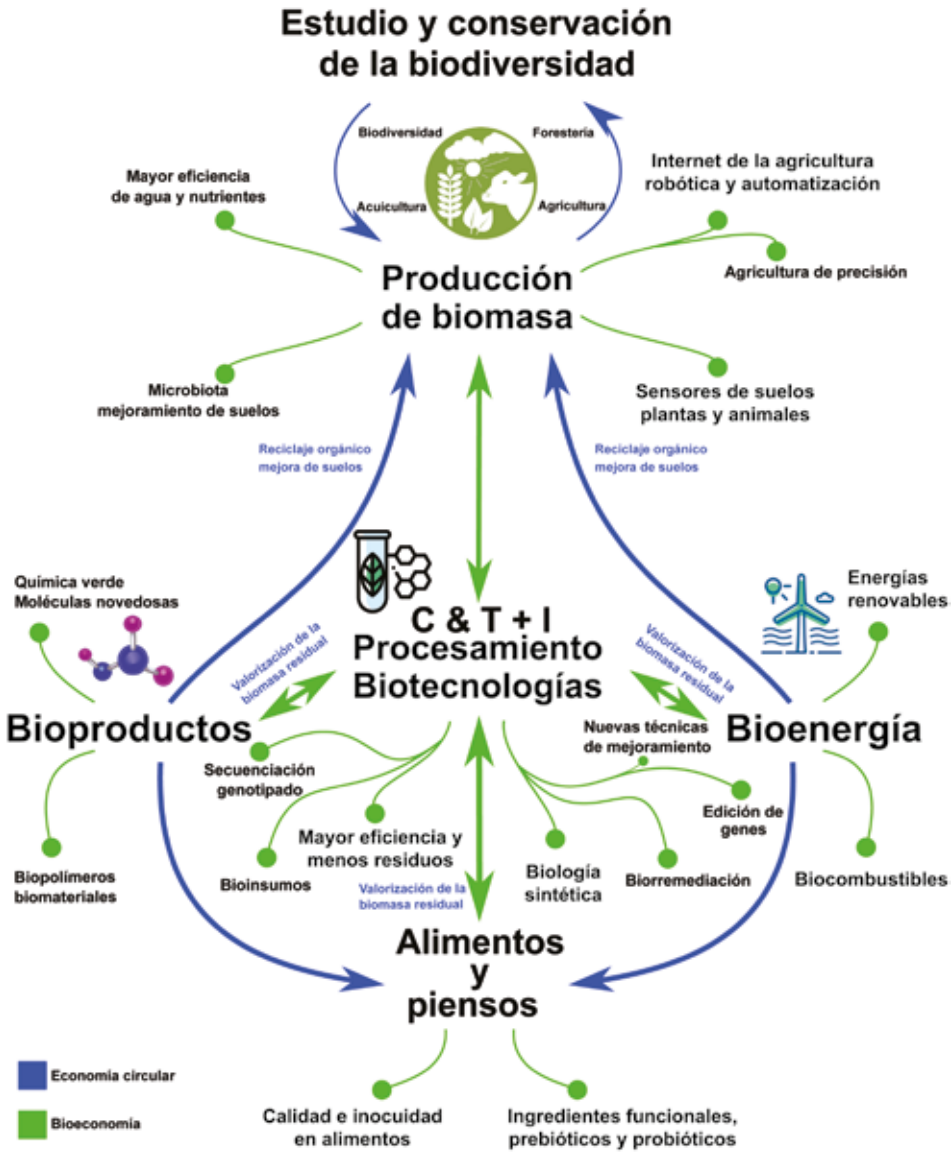


Figura 1. Bioeconomía y economía circular
Fuente: elaborado por Édgar Francisco Otálora

nanotecnología, biotecnología, tecnologías de la información y ciencias cognitivas. Sin embargo, la biotecnología es la tecnología de mayor peso relativo. Pero, para que este peso relativo sea realmente aprovechado, no debemos pensar que la fortaleza es tener muchos recursos en materia prima (recursos de la biodiversidad y biomasa de la agricultura), se debe tener también una inversión sostenida en ciencia y tecnología. Esta inversión garantizaría una buena infraestructura de investigación y desarrollo.

Las biotecnologías presentan múltiples aplicaciones en diversos sectores: agrobiotecnologías, vegetal y animal (bioinsumos —biofertilizantes, bioplaguicidas—, marcadores moleculares, micropropagación, vacunas, edición de genes, cultivos genéticamente modificados (GM) con resistencias o tolerancias a factores bióticos y abióticos, reproducción asistida animal, entre otros.

Biotecnología para la agricultura

Este capítulo no pretende ser exhaustivo en la enumeración de las posibilidades que ofrece la biotecnología a la agricultura, pero sí se resaltarán las que pueden mejorar los cultivos. Este mejoramiento es una necesidad por varias razones. La primera está relacionada con el crecimiento de la población mundial; para poder alimentar a esta población la producción agrícola deberá duplicarse para el año 2050. En este momento, la tasa de crecimiento anual en producción de los principales cultivos es del 0,9 % para trigo, 1,0 % para arroz, 1,3 % para soya y 1,6 % para maíz (Tilman *et al.*, 2011; Ray *et al.*, 2013) y no alcanzan para cubrir la demanda creciente. Además del aumento en la producción, existen otras necesidades que deben ser atendidas como la mejora en la calidad nutricional, el aumento de la resistencia a plagas y enfermedades y la tolerancia a los estreses (hídrico, salino, etc.), entre otras.

Para el mejoramiento existen cuatro grandes conjuntos de alternativas, según proponen Chen *et al.* (2019): (1) mejoramiento por cruces de

genotipos (todo el desarrollo dura entre 8 y 10 años); (2) mejoramiento por mutación, en la cual se aumenta la variación genética usando agentes mutagénicos (8 a 10 años); (3) mejoramiento por transgénesis (de 8 a 12 años), y (4) edición de genomas (4 a 6 años). Estas aproximaciones tienen en contra el tiempo necesario hasta la obtención del genotipo mejorado, pues no está alineado con las necesidades de demanda por una mayor y mejor producción. Por otro lado, las regulaciones sobre el desarrollo y uso de variedades mejoradas pueden causar demoras mayores. El panorama empeora cuando las regulaciones prohíben el uso de esas variedades, como en el caso de la prohibición de uso de variedades transgénicas en algunos países.

La controversia alrededor de los transgénicos es grande y mientras no haya evidencia científica sólida sobre los peligros de utilizar alimentos transgénicos, debemos reconocer su importancia en la agricultura. En efecto, hasta ahora la evidencia científica ha demostrado un impacto positivo en el control de enfermedades y mejoramiento de la calidad alimenticia. Dejando de lado esta controversia, en lo restante de este capítulo nos concentraremos en la edición de genomas, que es una técnica que promete muchos cambios en el futuro, de los cuales posiblemente la agricultura no escapará.

Edición de genomas

Editar un genoma se refiere a cambiar la secuencia de ADN de manera precisa, en un gen de interés. Se puede inactivar el gen creando un corte en su secuencia o bien este puede ser reemplazado por una secuencia particular. Esto lo logramos con una maquinaria molecular que ubica el gen, una enzima que corta la secuencia y, si se incluye una secuencia nueva, se puede lograr el reemplazo.

Para editar genomas se han desarrollado varias herramientas, todas basadas en un mismo concepto de módulos. Un módulo (molécula de ARN o proteínas) se encarga de llevar la maquinaria de edición a un sitio

preciso del ADN por reconocimiento de bases y, el otro módulo (enzima-endonucleasa) corta el ADN en sus dos hebras. El primer módulo puede estar constituido por proteínas con gran afinidad por una región dada del ADN. Este es el caso del sistema nucleasa-dedos de zinc (*zinc finger nucleases* [ZFN]) o el caso de los sistemas nucleasas-efectores, activadores de transcripción (*transcription activator-like effector nuclease* [Talen]) (Zhang *et al*., 2017).

Este primer módulo también puede ser una molécula de ARN, como en el caso del sistema CRISPR/Cas9 (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats* [CRISPR]- *associated protein 9*). CRISPR/Cas9 ha sido más utilizada hasta el momento por su facilidad de implementación y porque resulta más fácil manipular y sintetizar moléculas de ARN que proteínas. Por otro lado, es mucho más eficiente en producir las mutaciones deseadas (Zhang *et al*., 2017).

Hasta el momento, la técnica de CRISPR/Cas9 se ha utilizado para muchas especies vegetales tales como arroz, tomate, maíz, papa, sorgo, cebada, lechuga, algodón, petunia y varias de cítricos (Zhang *et al*., 2017). En la mayoría de los casos se ha usado solo para probar la eficiencia de la técnica y en otros casos como herramienta de genética reversa para estudiar la relación entre genotipo y fenotipo.

Clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR)

La técnica de *clustered regularly interspaced short palindromic repeats* (CRISPR) introdujo la posibilidad de edición genética de gran precisión en cualquier organismo. A continuación haremos una breve descripción del sistema, obviando algunos detalles moleculares y técnicos con el objetivo de que se entienda su funcionamiento.

Este sistema existe naturalmente en las bacterias y las ayuda a defenderse de los bacteriófagos (virus que atacan bacterias) que las atacan. Cada vez que un bacteriófago ataca una bacteria, si esta tiene un sistema CRISPR,

el ADN del bacteriófago es destruido y la bacteria introduce un fragmento del ADN destruido en su propio cromosoma. Así, dentro del genoma de la bacteria se constituye una gran cadena de segmentos de ADN de bacteriófagos que han infectado, históricamente, a la bacteria. Esta gran memoria de ataques compuesta de fragmentos de bacteriófagos es usada luego para reconocer bacteriófagos invasores y destruir su ARN. Cada fragmento de ARN de fago es asociado a una nucleasa, enzima que corta ADN. El ARN es el encargado de reconocer al bacteriófago que ha penetrado la bacteria y la nucleasa corta su material genético, defendiendo a la bacteria de los efectos del bacteriófago. Los biotecnólogos han puesto este sistema al servicio de la ciencia y combinando un ARN llamado guía y una nucleasa podemos editar cualquier región del genoma. En el sitio de reconocimiento se hace un corte de doble hebra del ADN blanco.

Luego del corte en el ADN, los mecanismos de reparación de células pueden intentar reparar el corte. Existen dos mecanismos de reparación: (1) reparación no homóloga de unión de extremos o NHEJ (por la sigla en inglés de *non-homologous end-joining*), en la cual el sistema une los extremos cortados pero se introducen mutaciones debido a las pequeñas deleciones en el sitio de corte; (2) reparación homóloga o HDR (por la sigla en inglés de *homology-directed repair*) que ocurre si se introduce, junto con el sistema CRISPR, una secuencia de ADN (de la misma especie u otra), y así el gen blanco puede reemplazarse por el introducido. Además, CRISPR/Cas9 presenta la gran ventaja de permitir la edición simultánea de varios genes.

Hasta ahora, ¿cuáles han sido los grandes aportes de CRISPR en la agricultura? (para algunos listados, véanse Zhang *et al*., 2017; Ricroch *et al*., 2017; Langner *et al*., 2018). En un estudio de publicaciones entre el 2014 y el 2017 se reportaron varios usos de CRISPR para la agricultura: usos en mejora del rendimiento (20 artículos), biofortificación (10), tolerancia a herbicidas (6), resistencia a virus (5), tolerancia a estreses abióticos (4), resistencia a hongos (3), bacterias (3) y parámetros de conservación como por ejemplo inhibición de la maduración de frutos (1) y el cultivo más estudiado: arroz (Ricroch *et al*., 2017).

En el caso de la resistencia a enfermedades, la técnica se ha usado para alterar la función de los genes de susceptibilidad, lo que ha demostrado

mayor resistencia en varias especies, incluyendo *Arabidopsis*, tomate, cítricos, arroz, cebada y trigo (Langner *et al*., 2018; De Toledo *et al*., 2016). Otros ejemplos son el aumento del tamaño y grosor del grano del trigo, la resistencia al mildeo polvoso en el trigo, la resistencia al añublo en el arroz y un aumento de tres veces del tamaño del fruto y de diez veces en el número de frutos del tomate (Langner *et al*., 2018; Cermark *et al*., 2017; Zhang *et al*., 2017). También, inactivación de genes que afectan negativamente la cosecha de arroz (Li *et al*., 2016; Shen *et al*., 2016). El uso de CRISPR/Cas9 abre la posibilidad de editar fácilmente, y a costo más bajo que los transgénicos, los llamados cultivos huérfanos como yuca, sorgo, batata, entre otros (Khan *et al*., 2019), o de hacer domesticación *de novo*.

En la mayoría de los casos, las parientes silvestres de los cultivos tienen poco rendimiento o características no deseables para su comercialización. En general, las hemos usado como reservorio de genes importantes en la resistencia a patógenos o tolerancia a estreses. De hecho, son fuente de genes para una edición de tipo HDR en los cultivos tradicionales. Con las técnicas de edición podemos pensar en un mejoramiento al revés, es decir, no cambiar las especies cultivadas sino editar las especies silvestres. En estas el objetivo sería mejorar las características que no las hacen atractivas para producción; este proceso se denomina domesticación *de novo* (Khan *et al*., 2019).

Hoy en día es posible usar una nucleasa modificada que no corte el ADN (dCas9 o Cas9 deficiente) pero que ayude a transportar al sitio deseado del genoma la enzima o, en general, la molécula que se escoja. Por ejemplo, se puede transportar: (1) cualquier enzima que modifique el ADN o las histonas asociadas, (2) activadores o silenciadores de transcripción, (3) RNAs pequeños no codificantes que afecten la transcripción. También, se pueden marcar secuencias de ADN con proteínas fluorescentes e incluso editar ARNs (Pulecio *et al*., 2017; Chen *et al*., 2019). Recientemente, se ha mostrado la aplicación de CRISPR para alterar bases únicas del ADN, una única base nucleotídica, y así se podrían alterar codones de parada, y modificación del *splicing* alternativo, entre otros (Molla y Yang, 2019).

Sin embargo, debemos mencionar los problemas que existen. El mayor problema es la incorporación eficiente del sistema en las plantas,

lo cual lleva a pensar en el mejoramiento de los métodos actuales de transformación de plantas. Tradicionalmente, se han manejado dos: el uso de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, que puede introducir genes en el genoma de la planta, y el bombardeo de partículas recubiertas de ADN en tejidos vegetales. Sin embargo, estos métodos tradicionales presentan algunos problemas. Por ejemplo, el uso de *Agrobacterium tumefaciens* no es eficiente en algunas plantas, en particular en monocotiledóneas. Así, se han planteado alternativas como el uso de otras bacterias o el mejoramiento de la eficiencia de transformación en monocotiledóneas por modificación de algunos genes de desarrollo de la planta. También se ha propuesto el uso de nuevos tejidos para transformación como polen, cigotos y nuevos sistemas basados en nanopartículas y partículas tipo virus.

El otro gran problema es la ocurrencia de ediciones en sitios diferentes a la región blanco (ediciones *off-target*). Una posibilidad para evitar este problema es usar ribonucleoproteínas (RNPs) como complejo introducido en la planta, eliminando la introducción de ADN para que sea transcrito y traducido en la célula vegetal. Los RNPs han mostrado una baja tasa de ediciones fuera del blanco (Chen *et al*., 2019). Otras modificaciones del sistema se están desarrollando para mejorar la especificidad (Chen *et al*., 2019). El otro reto es aumentar la frecuencia de la reparación homóloga, manipulando las rutas celulares de reparación.

Conclusiones

La importancia de la biotecnología agrícola en la construcción de la bioeconomía es innegable. Su mayor contribución potencial parece estar en el mejoramiento vegetal. Sin embargo, se necesitan herramientas cada vez más sofisticadas que nos permitan ahorrar recursos y tiempo en la obtención de variedades mejoradas, respondiendo a la creciente demanda de más y mejores alimentos.

En las secciones anteriores nos concentramos en las herramientas aplicables a los cultivos. Sin embargo, existen varias opciones que se pueden

aplicar a los organismos asociados a los cultivos, bien sean benéficos o patogénicos, que pueden contribuir a una mejor producción vegetal para el bienestar de las futuras generaciones.

Referencias

Cermak, T., Curtin, S. J., Gil-Humanes, J., Cegan, R., Kono, T. J. Y., Konecna, E., Belanto, J. J., Satrker, C. G., Mathre, J. W., Greenstein, R. L. y Voytas, D. F. (2017). A multipurpose toolkit to enable advanced genome engineering in plants. *Plant Cell* 29, 1196-1217.

Chen, K., Wang, Y., Zhang. R., Zhang, H., and Gao, C. 2019. CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 667-697.

De Toledo Thomazella, D. P., Brail, Q., Dahlbeck, D. y Staskawicz, B. J. (2016). CRISPR-Cas9mediated mutagenesis of a DMR6 ortholog in tomato confers broad-spectrum disease resistance. bioRxiv 064824. https://doi.org/10.1101/064824

Global Bioeconomy Summit. (2018). Communiqué. Documento procedente del Global Bioeconomy Summit 2018-Innovation in the global bioeconomy for sustainable and inclusive transformation and wellbeing. http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Communique.pdf

Gutzmann, N., Elsensohn, J. E., Cavin Barnes, J., Baltzegar, J., Jones, M. S. y Sudweeks, J. (2017). CRISPR-based gene drive in agriculture will face technical and governance challenges. *EMBO Reports 18* (9), 1479-1480.

Khan, M. Z., Zaidi, S.S.-A., Amin, I. y Mansoor, S. (2019). A crispr way for fast-forward cropdomestication. *Trends in Plant Science*, 24, 293-296, https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.011

Langner, T., Kamoun, S. y Belhaj, K. (2018). CRISPR crops: Plant genome editing toward disease resistance. *The Annual Review of Phytopathology*, 56, 479-512

Li, M., Li, X., Zhou, Z., Wu, P., Fang, M., Pan, X., Lin, Q., Luo, W., Wu, G. y Li, H. (2016). Reassessment of the four yield-related genes Gn1a, DEP1, GS3, and IPA1 in rice using a CRISPR/Cas9 system. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 377.

Pulecio, J., Verma, N., Mejía-Ramírez, E., Huangfu, D. y Raya, A. (2017). CRISPR/Cas9 – based engineering of the epigenome. *Cell Stem Cell* 21, 431-447.

Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C. y Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PloS One*, 8: e66428.

Ricroch, A., Clairand, P. y Harwood, W. (2017). Use of CRISPR systems in plant genome editing: Toward new opportunities in agriculture. *Emerging Topics in Life Sciences*, 1, 169-182.

Shen, L., Wang, C., Fu, Y., Wang, J., Liu, Q., Zhang, X., Yan, C., Qian, Q. y Wang, K. (2016). QTL editing confers opposing yield performance in different rice varieties. *Journal of Integrative Plant Biology*, 60 (iss. 2), 89-93. doi:10.1111/jipb.12501

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. y Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, USA, 108, 20260-20264.

Trigo, E. J., Henry, G., Sanders, J., Scurr, U., Ingelbretch, I., Revel, C., Santana, C., y Rocha, P. (2013). Towards bioeconomy development in Latin America and the Caribbean. *Bioeconomy working paper* 2013-01. Alcue-kbbe Project.

Wang, F., Wang, C., Liu, P., Lei, C., Hao, W., *et al*. (2016). Enhanced rice blast resistance by CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the ERF transcription factor gene Oserf922. *PloS One* 11:e0154027.

Zhang, H., Zhang, J., Lang, Z., Botella, J. R. y Zhu, J.-K. (2017). Genome editing principles and applications for functional genomics research and crop improvement. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 36, 291-309.

Química verde y la convergencia tecnológica

María del Pilar Noriega Escobar

La química verde es uno de los sectores promisorios para la nueva revolución industrial en el contexto de la producción integrada, ya sea a la medida, personalizada o a gran escala, haciendo uso de la convergencia de tecnologías nano-bio-info-cogno (NBIC) y disciplinas como, por ejemplo, ingenierías, química, biología, tecnologías de la información y la comunicación. La química verde, también llamada química sostenible, se refiere al diseño de productos, químicos, agroquímicos, renovables, y procesos que reducen o eliminan el uso o generación de sustancias peligrosas (American Chemical Society, 2020; United States Environmental Protection, 2020). La química verde aplica a lo largo del ciclo de vida de un producto, desde su diseño, fabricación, uso y disposición final. Algunos de los principios de la química verde son uso de materias primas renovables, diseño de químicos y solventes benignos, diseño para la eficiencia energética, diseño para la degradación, diseño de síntesis más amigables con la salud y el medio ambiente, reducción de subproductos y derivados, prevención de residuos, análisis en tiempo real para prevenir la contaminación y química para la prevención de accidentes.

Colombia es uno de los grandes productores de bioetanol a partir de caña de azúcar y biodiésel (*i. e.* metil-ésteres de ácidos de grasos) a partir de palma de aceite en las Américas. Este campo involucra hoy en día más de 800 000 hectáreas sembradas, 160 municipios y 21 departamentos del país, así como más de 130 alianzas productivas estratégicas (Fedepalma, 2020).

Estas plantas de producción de biocombustibles tienen subproductos, con alto potencial de creación de valor agregado en el futuro, tales como la biomasa sólida y líquida, la glicerina, posibles biobasados y biopolímeros, así como otros productos derivados que pueden ser desarrollados por biorrefinerías y que tienen un alto potencial de uso en diversos sectores tales como el de alimentos, cosméticos, farmacéuticos, productos de aseo y cuidado personal, polímeros, plastificantes, pinturas, lubricantes, entre otros.

Este sector contribuiría con diferentes frentes en el país, a la transición energética más amigable con el medio ambiente, a su diversificación del aparato productivo, a la generación de emprendimientos o empresas *start-up* o *spin-off*, pero también de grandes compañías o grupos empresariales dependiendo de los mercados y consumidores. Se fortalecerían también los clústeres y desarrollos regionales teniendo en cuenta sus recursos y economía.

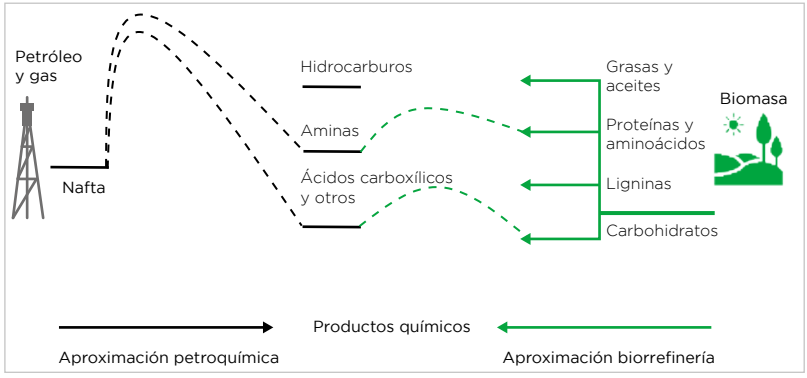
El reto Colombia Productiva y Sostenible propuesto por la Misión de Sabios busca, entre otros indicadores, que para el 2030 se dupliquen la producción de la agricultura y sus servicios profesionales, científicos y técnicos, a través del aprovechamiento de las tecnologías convergentes e industrias 4.0, el suministro de productos y servicios de mayor complejidad, de alta calidad e impacto ambiental cada vez más reducido.

Considerando el estado tecnológico de hoy y sus recursos humanos, Colombia podría convertirse en un líder en las Américas en el campo de la química verde: creando valor agregado a partir de su reconocida biodiversidad, una economía basada en el conocimiento, la producción sostenible de materias primas agrícolas, las capacidades instaladas actuales y futuras para el procesamiento de la biomasa, así como fortalezas y oportunidades por las sinergias de la nano y biotecnología, tecnologías de la información y comunicación y neurotecnologías (*i. e.* NBIC). Un ejemplo de este potencial es el cultivo de la palma de aceite, el cual produce una biomasa sólida (fibras ricas en celulosa y lignocelulosa) y el aceite de palma que puede ser transformado en gran variedad de productos, conocidos como oleoquímicos, tales como ácidos grasos, ésteres grasos y alcoholes grasos, los cuales pueden sustituir a los producidos a partir de fuentes fósiles, sin

afectar a la seguridad de los alimentos. La agricultura sostenible tiene en la química verde un importante soporte.

Otros ejemplos de cultivos con potencial agroindustrial son los de las oleaginosas, higuerilla y sacha inchi, que generan aceite, nueces, harinas y biomasa sólida.

La figura 1 ilustra los usos de la biomasa como materia prima energética y ambientalmente más eficiente (Sanders *et al.*, 2007).



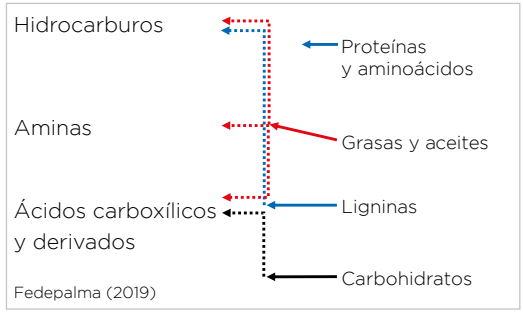


Figura 1. Química verde: la oportunidad para Colombia
Fuente: elaboración propia a partir de Sanders *et al.* (2007)

Desarrollo de recurso humano y su retención

Los avances en biotecnología deben ser soportados en Colombia por las ciencias básicas y aplicadas, así como las ingenierías, que permitan nuevos conocimientos, capacidades, habilidades y transferencias de tecnología en bioquímica, agroquímica, oleoquímica, alcolquímica, entre otras, para los sectores agroindustriales e industriales del país.

Por otro lado, la biotecnología es parte de la convergencia tecnológica, así que en conjunto con la nanotecnología (*i. e.* nuevos materiales) y las tecnologías de la información y comunicación, se podrá formar talento humano competente para el país que encuentre retos y oportunidades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, tanto en la academia, como en la industria, y muy probablemente, en las instituciones públicas y privadas relacionadas con el desarrollo rural y agroindustrial.

La retención del talento humano calificado se podrá dar por la gran versatilidad del campo de la química verde y biotecnología combinado con sistemas integrados y colaborativos de producción y plataformas de información y negocios en línea para la pequeña, mediana ("a la medida", personalizados) y la gran escala.

Las posibilidades de diversificación industrial y emprendimientos (incl. *start-up*, *spin-off*) también generarán una movilidad laboral y empresarial que contribuirán con el crecimiento económico del país en el mediano y largo plazo.

Transformación del sistema educativo

Los avances en biotecnología deben ser soportados en Colombia con la modernización de algunas carreras de pregrado existentes o con la creación de nuevos programas de posgrado que los fortalezcan. Internacionalmente

ya existe la carrera de Ingeniería Química y Biología o Ingeniería Química y Biotecnología en universidades como, por ejemplo, Wisconsin-Madison (Estados Unidos), Cambridge (Reino Unido), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausana (Suiza).

La modernización del aprendizaje gracias a las nuevas tecnologías y la internacionalización son parte de la transformación del sistema educativo, así como la flexibilización en los currículos interprogramas o intercampus que facilitarían la formación de acuerdo con los intereses del estudiante y los mercados que lo demandarán en el futuro. Sin embargo, los programas deben también poner énfasis en competencias tales como la comunicación, la creatividad, la colaboración, la disciplina y el pensamiento crítico.

La creación y transferencia de conocimiento en la transformación educativa ocurre también por las oportunidades de aprendizaje, el diálogo y el contacto directo entre universidades, centros e institutos y empresas, o por la movilidad de estudiantes, docentes e investigadores hacia las empresas, y de profesionales de las empresas hacia las universidades.

La ética en la era digital (política pública)

La biotecnología en la era de la convergencia tecnológica debe conducir al crecimiento económico de un país como Colombia, teniendo en cuenta la gestión ética de sus recursos naturales y su biodiversidad, sin afectar el suministro de alimentos y la salud humana. Esto requiere políticas públicas y marcos regulatorios que promuevan el uso de tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente.

La química verde sería una gran plataforma para desarrollar nuevos materiales, productos y aplicaciones que crearan valor y oportunidades para la industria en proceso de diversificación y para las nuevas industrias enmarcadas en la sostenibilidad del país y alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Alianzas públicas, privadas e internacionalización

El sector de la química verde facilita el enfoque "a la medida" o personalizado, por ejemplo, cosméticos, cosmecéuticos y productos orgánicos para el cuidado personal y aseo, como el de gran escala, por ejemplo, glicerina en diferentes grados, detergentes, plastificantes, pinturas, por la diversidad de productos. Aquí los procesos de manufactura robustos con monitoreo remoto, por ejemplo, internet de las cosas, IoT, serán la clave para la producción integrada y colaborativa.

Se podría pensar en consorcios precompetitivos tipo *public private partnership* (PPP) con la academia, la industria y aliados nacionales e internacionales, tales como, Lurgi, Sulzer, Ballestra, Cremer, BDI, Dow, Ecopetrol, Unilever, Wilmar, Fraunhofer, Cirad, por nombrar algunos.

Atracción de inversión

La química verde es un sector prometedor para las inversiones y para la atracción de capitales nacionales e internacionales que requieren políticas de ciencia, tecnología e innovación (CTI), estables de largo plazo. Estos capitales deben acelerar la transformación de la adopción digital, modernización de la infraestructura y aparato productivo que son la base de la nueva revolución industrial. Estos también acelerarán la creación de empleos de calidad y mejor remunerados y el surgimiento de nuevos emprendimientos y empresas en Colombia.

Mecanismos para garantizar el acceso al mercado

Para facilitar el acceso al mercado de los productos derivados de la química verde es necesario crear las condiciones que permitan que estos productos puedan ser competitivos frente a los sustitutos fósiles. Por lo cual es necesario que se creen los mecanismos e incentivos para promover el consumo nacional y la exportación a mercados que reconozcan su valor agregado.

Equilibrio entre la academia y sistema nacional CTI

Las universidades, así como los institutos de investigación, los centros de desarrollo tecnológico, los parques tecnológicos y otros actores CTI de Colombia desempeñan un gran papel en la química verde y la nueva revolución industrial. Será muy importante identificar las brechas tecnológicas y relaciones entre la universidad, institutos y actores CTI y la empresa, para disminuirlas rápidamente a través de la generación o apropiación de tecnologías existentes, así como alianzas, dependiendo de los materiales, procesos y productos involucrados.

Lograr en investigación, desarrollo e innovación (I + D + i) la asociación de Colombia con química verde o sostenible, tecnologías limpias e innovación será un elemento diferenciador en los mercados internacionales que impulsaría el crecimiento económico del país.

Innovación en políticas públicas: modernización y referenciación

Respecto a las políticas públicas de innovación se requieren instrumentos y plataformas únicas de información y comunicación para poder alinear los ministerios y las instituciones relacionadas con la química verde, la convergencia tecnológica y la nueva revolución industrial. Sería necesario unificar e instrumentar las políticas de los ministerios de Ciencia, Tecnología e Innovación, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Comercio, Industria y Turismo, así como Innpulsa, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y el Programa de Transformación Productiva (PTP), entre otras instituciones. Se trata de lograr las innovaciones en el país en un plazo más corto, puesto que se contaría con una institucionalidad interconectada, eficaz y eficiente.

Se requieren nuevos reglamentos técnicos y regulaciones para preservar el acceso ético y correcto a los recursos naturales y biodiversidad de Colombia. En relación con la propiedad intelectual e industrial será importante la implementación de una vía rápida *fast track* para el registro y protección de las tecnologías que comprenden química verde o sostenible, biotecnología y su convergencia tecnológica, ya que la evolución tecnológica en esta materia es muy rápida.

Referencias

American Chemical Society. (2020). Green Chemistry. https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry.html

Fedepalma. (2020). La palma de aceite en Colombia. http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/infografia-palmadeaceite-colombia-2020.pdf

Sanders, J., Scott, E., Weusthuis, R. y Mooibroek, H. (2007). Bio-refinery as the bio-inspired process to bulk chemicals. *Macromolecular Bioscience*, *7* (2), 105-117. DOI: 10.1002/mabi.200600223

United States Environmental Protection. (2020). Basics of Green Chemistry. https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry

El modelo Fraunhofer y la investigación aplicada

Markus Eisenhauer y
María del Pilar Noriega Escobar

La Sociedad Fraunhofer de Alemania es motor alemán e internacional de innovación. Lleva a cabo investigaciones aplicadas de amplio beneficio para la sociedad y de reconocida utilidad directa para las empresas públicas y privadas. Su lema es "Approximavit sidera" ("Nos acercó a las estrellas").

Para el 2018 la Sociedad Fraunhofer tenía 26 600 empleados, 72 institutos y unidades de investigación con un volumen de negocios anual de € 2600 millones con sus principales inversiones en infraestructura, gastos de capital e investigación. La investigación por contrato ascendió en el 2018 a € 2200 millones. De esta suma, más del 70 % se derivó de contratos con la industria y de proyectos de investigación financiados por el sector público. Casi el 30 % es aportado por los gobiernos federales y estatales de Alemania.

El Dr. Joseph von Fraunhofer (1787-1826) originario de Baviera, científico, inventor y exitoso empresario, fue uno de los investigadores más importantes en la historia de la tecnología. Trabajó como físico, óptico y director de producción de vidrio para microscopios y telescopios en el Instituto Matemático Mecánico en la Alta Baviera. Creó instrumentos ópticos y telescopios astronómicos de alta calidad, previamente desconocida, solicitados en todo el mundo. Investigó la capacidad refractiva del vidrio y la difracción de la luz; descubrió las líneas espectrales de la luz solar también llamadas *líneas de Fraunhofer*.

La concepción de calidad superior a lo esperado y una curiosidad estructurada con un fin más allá de su tiempo forman el *leitmotiv* o el hilo conductor del modelo Fraunhofer. Un espíritu de calidad sobresaliente, logros empresariales notorios por la demanda de sus productos y curiosidad científica unida al uso de sus propios instrumentos lleva a descubrimientos que atraen sobre sí misma la atención.

El modelo Fraunhofer nace del reconocimiento y la necesidad de promover la investigación aplicada por medio de un vínculo directo y permanente entre industria y ciencia a principios de la década de 1950.

Esta orientación de los institutos Fraunhofer basa su lugar firme en el panorama científico con el apoyo a proyectos de investigación con fondos obtenidos de la industria y el establecimiento de sus propios institutos. Los ocho grandes campos de investigación son ciencias de la salud, tecnologías de la información y comunicación (TIC), microelectrónica, óptica y superficies, producción, materiales y componentes, defensa y seguridad e investigación para la innovación.

Las alianzas de investigación con los institutos Fraunhofer se encuentran en las siguientes áreas: adaptrónica, ambientes de vida asistidos, manufactura aditiva, baterías, *big data*, computación en la nube, medios digitales, construcción innovadora, estructuras esbeltas, tecnologías limpias, energía, nanotecnología, biotecnología, bioeconomía, administración de la cadena alimentaria, superficies poliméricas, simulación, transporte y tráfico, sistemas de agua, textiles inteligentes, entre otras.

Con relación a la biotecnología y a la bioeconomía, la demanda creciente de productos biobasados crea nuevos retos para la economía alemana, y genera preguntas sobre la seguridad alimentaria, la protección ambiental, el cambio climático y la escasez de recursos. Los impactos de la transformación bioeconómica involucran temáticas como el consumo sostenible o las estrategias de poscrecimiento.

Fraunhofer cuenta con aproximadamente 30 000 patentes y 7000 familias de patentes que abarcan la mayoría de las áreas de investigación, y tiene un estimado de 180 acuerdos marco de propiedad intelectual con universidades. Uno de los grandes logros de la sociedad Fraunhofer es hacer evidente el reconocimiento de la sociedad como representante de la

investigación aplicada en el ámbito político. Por lo anterior, realizar investigación y desarrollo con sus propios medios es una condición necesaria para afirmarse como actor relevante en el campo de la investigación aplicada.

El conjunto de institutos Fraunhofer encontraron en el resultado de esta actividad, el modelo Fraunhofer, que también proporciona una financiación básica inspirada en el éxito, la clave para evolucionar y conformar el sistema nacional alemán de innovación, además de apoyar la economía de Alemania y lograr un crecimiento sin precedentes.

Los diferentes institutos Fraunhofer tuvieron que proponer y responder a nuevas preguntas de investigación, orientaciones de expansión, planificación financiera y organizativa, estatutos renovados, reglamento marco para los institutos, informes sobre inclusión y participación de los empleados, sobre la expansión y organización de la administración central y sobre el sistema de remuneración.

La junta directiva, fortalecida en sus funciones y competencias, se convirtió en el núcleo político de orientación de la Sociedad Fraunhofer. La junta honoraria de varios miembros fue reemplazada por un trío de gestión de tiempo completo con áreas de negocio definidas de manera explícita. Se destacó claramente el liderazgo del presidente. El gobierno corporativo es el órgano supremo de toma de decisiones y control. El Consejo Científico y Técnico (WTR: Wissenschaftlich-Technische Rat) se estableció como órgano de codeterminación. Está compuesto por los directores de institutos y personal científico y técnico en igualdad de condiciones. El Comité de Gestión del Instituto (ILA: Institutsleistungsausschuss), conformado por directores, funcionarios y representantes electos del personal científico y técnico creado para los institutos, es similar al Consejo Científico.

El modelo Fraunhofer equilibra las funciones y competencias de los organismos y cuerpos colegiados. Fue importante encontrar el equilibrio adecuado entre los ministerios y Fraunhofer, por un lado, y la administración central y los institutos, por otro. El debate alrededor del gobierno corporativo demostró su valor cuando los mecanismos de regulación institucionalizada de conflictos entraron en funcionamiento.

Los conflictos fueron igualmente permeados por el consejo de administración, la administración de institutos y el WTR. En la Sociedad

Fraunhofer, los debates también dieron lugar a una gran cantidad de propuestas creativas que abrieron nuevas perspectivas.

La clasificación de las actividades de investigación propia de Fraunhofer, la investigación básica e investigación por contrato dio un aire adicional a los institutos Fraunhofer. La investigación básica y la investigación por encargo representan dos tercios de la actividad total de los institutos. Cada instituto está comprometido con obtener dos tercios de su propio presupuesto. La financiación básica o central aumenta a medida que crece el volumen de investigación por contrato y la investigación básica. Este es el tipo de financiación con una óptica diferente para la asignación de fondos (figura 1).

La Sociedad Fraunhofer es una eficiente patrocinadora de la investigación aplicada y pionera en probar nuevas formas de financiación de investigación con el fin de fortalecer la investigación por contrato, con el doble mandato de estar disponible como socio, tanto para las empresas, como para el gobierno. Esta es una de las características cardinales del modelo Fraunhofer de financiación básica o central relacionada con el rendimiento y los resultados.

Figura 1. El modelo Fraunhofer
Fuente: Eisenhauer y Bierdümpel (2019)

El modelo de financiación basado en resultados le implica un inmenso dinamismo a la Sociedad Fraunhofer y desencadena un crecimiento importante. El principio del modelo Fraunhofer es una herramienta ideal de planificación y control que obliga a una adaptación constante a los mercados futuros y, por lo tanto, mantiene el rendimiento.

El hecho de que la relación entre la financiación básica y la investigación contractual no se estableciera en detalle resulta ser una ventaja a largo plazo, ya que es posible adaptarla y reajustarla en función de las condiciones cambiantes en la ciencia, la industria y el Estado. Probar el modelo durante un periodo de tiempo razonable y revisarlo periódicamente dinamiza la estructura de los institutos Fraunhofer y es parte fundamental de la identidad de la sociedad (figura 2).

Figura 2. La posición de los Fraunhofer en el Sistema de Innovación Alemán
Fuente: Eisenhauer y Bierdümpel (2019)

La Sociedad Fraunhofer fue muy persuasiva para lograr una evaluación realista en los Ministerios Federales Alemanes. ¿Cuánto del presupuesto total podrían generar las propias instituciones? La argumentación asertiva llevó a acuerdos marco sobre financiación de la investigación donde más del 60 % fue considerado como meta ambiciosa. La relación entre la financiación básica o central y la investigación por contrato y la financiación basada en el rendimiento siguen siendo una preocupación para la Sociedad Fraunhofer en la actualidad.

El modelo Fraunhofer hace posible el enfoque de la investigación contractual orientada al mercado. La planificación estratégica de la investigación es un elemento central de control. Los diferentes institutos se dirigen a los principales programas de financiación del Estado. El crecimiento de la Sociedad Fraunhofer se da por la guía hacia los mercados y la industria. Se reconoce la importancia de la innovación técnica para el éxito de la industria. La planificación estratégica de la investigación es una prioridad y se alinea con los programas federales de tecnología. El objetivo es vincular a la universidad, a los institutos Fraunhofer y la investigación industrial para poder liderar proyectos en conjunto a lo largo de todo el proceso de innovación hasta la implementación industrial.

Además de la ciencia, los negocios y la política, también están representados otros sectores de la sociedad como los sindicatos y los medios de comunicación. El diálogo continuo para crear confianza es una herramienta vital entre los mismos institutos Fraunhofer.

Para lograr estas sinergias, el relacionamiento de los altos directivos de la Sociedad Fraunhofer desempeña un papel esencial. La identidad corporativa uniforme que hace visible a la Sociedad Fraunhofer, tanto a expertos como al público en general, es un elemento distintivo.

Referencias

Das Fraunhofer Magazin. (2019). 70 Jahre Fraunhofer 70 Jahre Zukunft #WhatsNext, weiter.vorn, Sonderausgabe 2/19. https://www.archiv.fraunhofer.de/weiter_vorn_2_2019/#0

Eisenhauer, M. y Bierdümpel, E. (2019). Fraunhofer at a glance. Segunda Cumbre de la Misión Internacional de Sabios, Cartagena de Indias, Colombia, 16 de septiembre del 2019.

Bioeconomía, modelo para un desarrollo territorial sostenible e inclusivo

Guy Henry y
Elizabeth Hodson de Jaramillo

Introducción

En un planeta de recursos limitados es urgente implementar alternativas eficientes y razonables para enfrentar el cambio climático y la grave situación de deterioro, agotamiento y contaminación ocasionados por la actividad humana. Es un imperativo ético cambiar la dependencia de las actividades humanas y de los sistemas productivos lineales basados en la energía fósil, hacia el uso de energías renovables, amigables con el ambiente. Es decir, virar del consumo de fotosíntesis de hace millones de años, al consumo de fotosíntesis en tiempo real en una ruta hacia una economía más sostenible y eficiente. La respuesta estratégica hacia ese nuevo sistema socioeconómico ambientalmente amigable es el enfoque de bioeconomía, el cual permite integrar objetivos de bienestar humano y del planeta en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en la cual se encuentran implícitos la conservación, gestión y uso sostenible de la biodiversidad. Este modelo engloba tanto al medio ambiente (el mundo natural, los recursos biológicos renovables, sus interacciones con las actividades humanas así como los sistemas de soporte a la vida: agua, suelos), así como a las biotecnologías como su principal herramienta. El núcleo de la bioeconomía es el uso de cualquier tipo de recursos biológicos (biomasa) de animales (incluidos los insectos), plantas y microorganismos para su aplicación directa o procesados, así como el aprovechamiento y valorización de todos los residuos (coproductos) obtenidos en las diferentes etapas.

La bioeconomía promueve la producción y utilización intensiva del conocimiento sobre los recursos, procesos y principios biológicos, para el suministro sostenible de bienes y servicios en todos los sectores económicos

—bioenergía, agrícola y bioinsumos, alimentos, fibras, productos para la salud, productos industriales y bioplásticos— (GBS, 2018). Cubre todos los sectores y sistemas que se basan en los recursos biológicos (animales, plantas, microorganismos y biomasa derivada incluyendo desechos orgánicos), sus funciones y principios, así como sus interacciones. Una bioeconomía sostenible y ecoeficiente es el segmento renovable de la economía circular que permite aprovechar la biomasa primaria y los productos, hasta incluso los desechos para convertirlos en recursos valiosos, reducir la contaminación y contribuir a la restauración de ecosistemas (European Commission, 2018). Los recursos biológicos pueden ser reutilizados, degradados y luego utilizados de nuevo. El elemento de la economía circular es inherente a los recursos biológicos.

Se trata de aprovechar los avances en ciencia, tecnología e innovación (C & T + I) para implementar un cambio transformativo bajo el concepto de la cuarta revolución industrial o tecnologías convergentes (nano y biotecnologías, bioinformática y ciencias cognitivas) para el conocimiento, conservación y aprovechamiento de los recursos terrestres y marinos. Esta innovación acelerada en C&T representa un cambio transformativo en tecnologías y capacidades de datos, cambio que no solo está modificando la investigación científica, las industrias y las redes sociales, sino que está remodelando radicalmente las innovaciones en ciencias biológicas y de materiales (World Economic Forum, 2018). Por otra parte, el concepto de bioeconomía circular está íntimamente relacionado con el desarrollo de nuevas actividades productivas a partir del aprovechamiento de la biomasa residual (por ejemplo, de procesos agrícolas y forestales) y de desechos (por ejemplo, desechos domésticos). La bioeconomía en sí misma depende de la aplicación de las nuevas fronteras de la ciencia y la tecnología y sus convergencias para utilizar más eficiente y sosteniblemente los recursos y principios biológicos. Dado que su base material y energética son los recursos biológicos, la bioeconomía es central en el cambio de modelo productivo que se requiere para enfrentar el cambio climático (Cepal-FAO-IICA, 2019). La bioeconomía es, por lo tanto, una respuesta a los desafíos de la creciente población mundial y el cambio climático.

Una característica fundamental de la bioeconomía es el uso sostenible de los recursos biológicos a partir de una amplia gama de tecnologías de punta (Keswani, 2020). El conocimiento científico que implica la bioeconomía constituye un enfoque transformativo para redefinir las relaciones entre el agro, la biomasa y la industria, lo que la hace el instrumento ideal para atender los desafíos interrelacionados de seguridad alimentaria, agotamiento de recursos y cambio climático. Con este enfoque se reduce al mínimo la producción de residuos, se generan nuevos productos y servicios en múltiples sectores, lo que permite abordar de forma integral y coherente los retos de una región y, al mismo tiempo, crear nuevas fuentes de crecimiento económico mediante el aprovechamiento integral y circular de la biomasa en procesos articulados en cadenas o redes de valor novedosas con oportunidades para la creación de empleo. Representa una oportunidad única de buscar mayor eficiencia en los productos y procesos biológicos bajo una perspectiva territorial y posibilitar el desarrollo socioeconómico y el bienestar de las comunidades.

Estado del arte de la bioeconomía en Colombia

El modelo conceptual de la bioeconomía comenzó a ser discutido inicialmente en círculos académicos y con algunas empresas o personas interesadas en bioenergía, y paralelamente en pequeñas empresas buscando la valorización de productos naturales, en particular, productos nativos del bosque. Hace diez años el término *bioeconomía* era fácilmente confundido con *economía verde* o *economía azul*. En Colombia se ha venido avanzando en diferentes frentes en relación con la bioeconomía.

Industria

La bioeconomía en Colombia inició con el desarrollo de bioproyectos y bioempresas, aplicando bioprocesos y generando bioproductos. Los primeros cultivos biotecnológicos (organismos genéticamente modificados [OGM]) utilizados en la agricultura colombiana hacia el 2002 fueron el clavel azul, luego el algodón y más tarde el maíz. Al mismo tiempo, creció el interés hacia la producción de bioenergía, y las empresas de caña de azúcar y de palma de aceite ampliaron sus portafolios desarrollando diferentes biocombustibles (bioetanol, biodiésel). Paralelamente, los avances científicos y tecnológicos en los laboratorios de biotecnología y similares generaron resultados muy interesantes y con potencial para ser procesados y luego incorporados a sistemas industriales productivos. Una buena discusión sobre la emergencia de las diferentes empresas y bioproyectos en Colombia se encuentra en Pisón y Betancur (2014), Henry *et al.* (2017) y Aramendis y Castaño (2019).

Políticas

La discusión sobre el modelo de la bioeconomía se abordó en la región desde el periodo 2007-2008, pero en Colombia, el primer evento específico sobre el tema tuvo lugar en 2010 mediante un taller, fruto de un proyecto europeo (ALCUE KBBE). Entró en la política colombiana por medio de discusiones dentro de los equipos de biotecnología de Colciencias. En paralelo, en el 2011, la revista *Semana* organizó un taller sobre el potencial de los bionegocios, en el cual varios expertos internacionales hicieron referencias a la bioeconomía.

En el 2016 el modelo de la bioeconomía empezó a tomar más vuelo en Colombia, como marco para el planteamiento de la revolución verde (*Semana*, 2016). En ese momento, el Departamento Nacional de Planeación (DNP), con apoyo del Banco Mundial, inició su proyecto Misión de Crecimiento Verde, que produjo en el 2019 el Conpes 3934 de Crecimiento Verde, en el cual el enfoque central es la "bioeconomía, como fuente de nuevas industrias basadas en el capital natural de Colombia" (DNP, 2019).

Estas políticas y su relevancia para la bioeconomía en Colombia están discutidas en detalle en Henry *et al.* (en prensa).

Academia

Las primeras notas y discusiones en el ámbito académico sobre el potencial del modelo de la bioeconomía salieron al aire a partir del 2010, con la participación de la Pontificia Universidad Javeriana en el desarrollo del Proyecto "Knowledge Based Bio-Economy (KBBE)". Varios grupos de investigación de las universidades y centros de investigación enfocados en la biotecnología y sus aplicaciones se fueron sumando al diálogo que se estableció, y se fortalecieron diversas actividades.

Actualmente, en la mayoría de las universidades colombianas más destacadas, así como en los centros de investigación el modelo de la bioeconomía, (1) está siendo aceptado como un marco para discusiones y análisis integrados de temas socioeconómicos y ambientales, especialmente en el marco de los ODS, y (2) está siendo trabajado en proyectos de investigación tecnológica y de innovación. Es así como el modelo está pública y académicamente defendido con sólidos argumentos científicos por la rectora de la Universidad Nacional de Colombia (Montoya, 2019).

Propuestas del Foco Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente (BBMA)

Los principales planteamientos del Foco Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente (BBMA) de la Misión Internacional de Sabios 2019, indican que la bioeconomía constituye el marco conceptual y político, así como el soporte del desarrollo socioeconómico sostenible de Colombia con enfoque territorial, mediante el uso de las biotecnologías que constituyen la herramienta fundamental para descubrir, conocer y desarrollar una extraordinaria gama de procesos, bioproductos e innovaciones, así como para potenciar la productividad y la eficiencia de la agricultura, la bioenergía, garantizar la seguridad nutricional de los colombianos y resolver

problemas ambientales de salud e industriales (Misión Internacional de Sabios, 2020).

El cambio climático y la destrucción y degradación de los ecosistemas son la razón principal de la pérdida de la biodiversidad, así como una amenaza para el desarrollo y la calidad de vida. Es claro que los pilares fundamentales de la gestión ambiental y el desarrollo de la bioeconomía son el conocimiento científico, el enfoque territorial, la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible de los ecosistemas. Es necesario promover la C & T + I con el fin de entender las causas y consecuencias de los retos y proponer soluciones. La búsqueda de soluciones a los problemas ambientales de Colombia requiere el establecimiento de programas de investigación específicos orientados a temas tan relevantes como el agua, los bosques y la reducción de la deforestación. Para avanzar en este sentido la inversión en C & T + I debe incrementarse en los temas de BBMA, con énfasis en el apoyo a los institutos de investigación del Sistema Nacional Ambiental, los grupos de investigación en las universidades, los centros de investigación públicos y privados nacionales y regionales y en las colecciones de soporte (museos y herbarios).

Para el foco de BBMA el desarrollo de la bioeconomía debe ser la política pública clave para el cumplimiento de los ODS, así como para el logro del desarrollo integral sostenible e inclusivo de las distintas regiones del país y para el bienestar de sus comunidades, puesto que el capital natural de Colombia, con su inmensa biodiversidad, constituye el principal activo y la más extraordinaria riqueza presente y futura del país. En consecuencia, es esencial fortalecer la investigación científica y la innovación para mejorar el conocimiento de este capital natural y utilizarlo en la restauración, conservación y uso sostenible. Como tal, la piedra angular del grupo BBMA es mantener la salud, la diversidad y los servicios de los ecosistemas, y de soporte a la vida, al tiempo que se garantiza su sostenibilidad.

La investigación científica que se requiere para desarrollar el cambio productivo dentro de la bioeconomía requiere un enfoque inter y trans-disciplinario, e involucra un amplio conjunto de ciencias fundamentales, ciencias socioeconómicas, así como diversidad de ingenierías y herramientas de investigación de avanzada entre las que se encuentran las tecnologías

ómicas (secuenciación de ADN y ARN, proteómica, metabolómica, etc.), *big data*, inteligencia artificial, *machine learning*, *deep learning*, internet de las cosas, informática, robótica, nanotecnología y biología sintética, entre otras.

Asegurar la incorporación de los ODS a la agenda de investigación y desarrollo (I & D) de Colombia es un compromiso ineludible y urgente para la conservación de la biodiversidad, la gestión del medio ambiente y el desarrollo sostenible. El impulso a la bioeconomía circular y las energías renovables con estrategias de valorización de la biomasa en sistemas en cascada y a la investigación fundamental que le da soporte, constituyen un elemento para la mitigación del cambio climático y, particularmente, la deforestación y la reducción de la biodiversidad colombiana en todas sus formas y hábitats. Se plantea promover procesos más eficientes basados en el concepto de "producir más con menos", y trabajar en el desarrollo de sistemas de uso integral y completo de la biomasa, reduciendo la producción de residuos al mínimo en una bioeconomía inclusiva.

Los mecanismos requeridos para lograr lo anterior incluyen: (1) fortalecer el conocimiento del funcionamiento de los ecosistemas colombianos y sus componentes, la biodiversidad, con el fin de establecer herramientas de prevención y de acción para mitigar el cambio global, y (2) definir prioridades regionalizadas a partir del conocimiento de los hábitats clave de las diferentes regiones para su desarrollo sostenible. Además, se hace imprescindible definir la agenda de investigación (hoja de ruta de políticas y tecnologías) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y, generar estrategias de financiación estables y sostenibles para favorecer la investigación en los temas trascendentales para Colombia, específicamente en los temas de BBMA (ODS + bioeconomía, biotecnología y medio ambiente).

La visión de una bioeconomía para Colombia

No se puede establecer una bioeconomía sin visión. La visión es un requisito necesario para la formulación de su estrategia. Y la última es el producto de una consulta participativa con todos los actores pertinentes teniendo en cuenta las metas, los objetivos, las limitaciones y el capital de recursos del país. La Unión Europea ha sido pionera en la implementación de este enfoque de desarrollo sostenible. Por ejemplo, el modelo productivo de bioeconomía que planteó la Comisión Europea (European Commission, 2018) busca instaurar una sociedad más innovadora, eficiente en el uso de los recursos y competitiva que concilie la seguridad alimentaria con el uso sostenible de los recursos renovables para fines industriales, al tiempo que garantiza la protección del medio ambiente. La visión que se plantea para Colombia busca, por un lado, conservar y proteger los recursos, y por el otro integrar conocimiento y tecnología para el aprovechamiento productivo sostenible de esos recursos, de manera que genere desarrollo y bienestar a nivel regional.

Durante los últimos años en muchas reuniones y discusiones se ha debatido sobre la estrategia de bioeconomía para Colombia, cuál es su visión, su meta, sus objetivos, etc. Sin embargo, solamente algunos proyectos generaron propuestas concretas. Estos son (1) Misión de Crecimiento Verde, (2) Misión Internacional de Sabios 2019, en el Foco Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente (BBMA) y (3) Proyecto de Bioeconomía en Colombia, del Stockholm Environment Institute (SEI), 2019.

Las actividades más relevantes para la implementación del modelo productivo basado en la bioeconomía incluyen las planteadas Misión de Crecimiento Verde, Conpes 3934 Política de Crecimiento Verde del 2018. El crecimiento verde hace referencia a aquellas trayectorias de crecimiento que garantizan el bienestar económico y social de la población en el largo plazo, asegurando la conservación del capital natural y la seguridad climática. Este tipo de crecimiento está basado en la innovación como fuente

de crecimiento sostenible, que a su vez abre paso a nuevas oportunidades económicas. Por lo tanto, adoptar un modelo de crecimiento verde implica encaminar al país hacia una senda del desarrollo sostenible (DNP, 2018). Esta Misión Crecimiento Verde, Visión para Colombia 2030 plantea transitar hacia un modelo socioeconómico sostenible que produzca los bienes y servicios necesarios para garantizar un bienestar inclusivo para la sociedad, preservando el capital natural. Alcanzar este modelo implica un actuar colectivo que aproxime a la sociedad a la comprensión del papel de los recursos naturales como fuente de bienestar y satisfacción de necesidades, y la generación de cambios en la forma de pensar y vivir de los ciudadanos hacia un esquema sostenible y adaptado al cambio climático. El Gobierno debe formular una política pública de crecimiento verde de largo plazo que brinde las herramientas necesarias a los ciudadanos, a la academia y a las empresas para propiciar la transformación social y económica deseada para el año 2030 (DNP, 2018). Es importante destacar que el modelo económico para el DNP es el modelo de crecimiento verde y la bioeconomía solo figura como uno de sus diez objetivos para su hoja de ruta. Sin embargo, eso más bien es una discusión semántica, lo más importante es la visión amplia de desarrollo productivo con sostenibilidad social, ambiental y económica. En su utilización del modelo de la bioeconomía, la Misión de Sabios no planteó una estrategia explícita sino más bien una reflexión sobre la visión de la bioeconomía colombiana. Propuso el modelo con el fin de integrar objetivos de bienestar humano y del planeta, fundamentado en avances de ciencia y tecnología. De esta manera, la misión tomó la bioeconomía como marco conceptual y oportuno con el objetivo de mejorar el bienestar de las personas y todos los activos biológicos en Colombia, en concordancia con los ODS (Misión Internacional de Sabios, 2020).

Proyecto Stockholm Environmental Institute (SEI) Bioeconomía Colombia. Un esfuerzo adicional más reciente es el trabajo liderado por el SEI, como parte de su proyecto en el que se analiza la gobernanza de bioeconomías en diferentes países, siendo Colombia uno de ellos (SEI, 2020). Durante el taller realizado a finales del 2019, coorganizado con el DNP, se analizaron diferentes visiones de la bioeconomía enfocándose en diferentes grupos/sectores a saber: (a) agricultura, (b) bioquímica,

(c) bioenergía, y (d) biofarmacéutica. Por cada sector se identificaron (bio) productos principales y acciones para lograr la visión por sector. Generaron un cuadro de sector/acción. Muy interesante, y de repente como un sustituto por una visión nacional es su formulación de la "identidad" de la bioeconomía colombiana:

> La bioeconomía colombiana es circular, basada en la gestión del conocimiento y la innovación en redes de valor (no cadenas de valor). Tiene un enfoque regional, basado en la biodiversidad de las especies nativas del territorio, y apoyando el desarrollo de las comunidades locales. Además, se articula con los ODS y con el Acuerdo de París. (SEI, 2020)

La realidad es que los planteamientos fundamentales y las visiones formuladas en los tres proyectos son muy similares *au fond*. Se encuentran elementos claros y útiles que apuntan a una noción de la visión integral de la bioeconomía para el país. Sin embargo, hace falta una consulta participativa amplia, con los actores principales, para confirmar o por lo menos consolidar lo que hay, de una manera robusta y transparente. Lo que ya es muy evidente es que la visión de la bioeconomía colombiana tendría que estar vinculada estrechamente como marco conceptual y referencial con el trabajo para responder a las metas propuestas por el Gobierno colombiano y satisfacer los ODS.

Construcción de hoja de ruta (senderos) para la transición hacia una bioeconomía en Colombia

Desde el 2017 diferentes grupos e instancias, basados en proyectos y actividades diversas han venido trabajando en la formulación de estrategias y hojas de ruta para la bioeconomía colombiana. En relación con las políticas y las

estrategias nacionales, el tema se encuentra incluido explícitamente en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2018-2022 "Pacto por Colombia, pacto por la equidad" el cual incluye 20 metas para transformar a Colombia con pactos transversales y regionales. En este PND la bioeconomía se encuentra relacionada de manera directa en el pacto IV de pactos transversales, "Pacto por la sostenibilidad: producir conservando y conservar produciendo". La agenda de sostenibilidad es transversal al desarrollo e impulsa acciones que permitan el equilibrio entre la conservación y la producción, en las que la biodiversidad se considera un activo estratégico y se busca el desarrollo de bienes y servicios basados en el uso sostenible de la biodiversidad como una herramienta para dinamizar las economías locales, además, se habla de innovación y reconversión tecnológica para una industria sostenible. Indirectamente el tema también se encuentra en el V Pacto por la ciencia, la tecnología y la innovación: un sistema para construir el conocimiento de la Colombia del futuro, en el que se plantea que la sociedad y la economía del futuro estarán fundamentadas en el conocimiento. El fin es fortalecer las capacidades en C & T + I como estrategia de desarrollo regional, lo cual es el fundamento de los desarrollos biotecnológicos y por ende de la bioeconomía.

Como documentos complementarios de establecimiento de estrategias y hojas de ruta en relación con el enfoque de bioeconomía se encuentra el Conpes 3918 como la estrategia para la implementación de los ODS en Colombia, en el que se establecen 16 grandes apuestas con 16 indicadores trazadores sobre los cuales se tiene un monitoreo particular. Otro de los documentos que representa una valiosa herramienta para delinear estrategias para el desarrollo de la bioeconomía en Colombia es el Plan estratégico de ciencia tecnología e innovación para el sector agropecuario (Pectia) 2017-2022, que incluye orientaciones muy valiosas para el fortalecimiento del sector.

En paralelo con el contexto anterior se han realizado múltiples reuniones de cooperación técnica internacional con varias delegaciones como la Embajada Británica, la Embajada Alemana entre otras. En este capítulo se presentan las que han generado resultados más concretos, a saber: (1) el Modelo Crecimiento Verde, DNP, (2) el Foro Nacional de Bioeconomía:

Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (Cirad, por su sigla en inglés) y Colciencias, y (3) el Proyecto Stockholm Environmental Institute (SEI) Bioeconomía Colombia.

Modelo de Crecimiento Verde (Conpes 3934)

Según el modelo del Crecimiento Verde, habrá 10 objetivos dentro su hoja de ruta. El primero es la construcción de la bioeconomía, así "Promover la bioeconomía como estrategia de desarrollo económico contribuye a la gestión sostenible de la biodiversidad, genera productos de mayor valor agregado, y apalanca el progreso regional" (DNP, 2018).

Para ello, se formularon como prioridades: (1) aprovechar sosteniblemente los recursos, procesos y principios biológicos de la biodiversidad colombiana, (2) impulsar las actividades bioeconómicas, "incluyendo" el aprovechamiento de la biomasa, (3) incrementar la inversión pública y privada en el impulso a la bioeconomía, (4) promover el desarrollo tecnológico, y (5) priorizar la formación de capital humano en áreas estratégicas (DNP, 2018). Además, se priorizaron diferentes sectores para iniciar las actividades bioeconómicas: cosméticos y aseo, químicas, farmacéuticas, salud, agrícola y pecuaria, alimentos y bebidas.

La hoja de ruta Crecimiento Verde, para diferentes grupos de actores se propuso de la siguiente manera (DNP, 2018):

Gobierno:

- Crear un comité de coordinación de bioeconomía.
- Diseñar un programa de compra pública de tecnologías verdes innovadoras.
- Establecer un plan de superación de retos regionales con soluciones bioeconómicas.
- Crear un fondo de fondos para capital de riesgo, especializado en bioeconomía.
- Diseñar beneficios tributarios de corto plazo a emprendimientos (*start-up*) de bioeconomía.
- Consolidar un repositorio genético de referencia mundial.

Empresas

- Sustituir y actualizar tecnologías.
- Conformar y gestionar un portafolio de proyectos impulsores de bioeconomía regional y nacional.
- Cofinanciar el desarrollo de pequeñas y medianas empresas de bioeconomía.
-

Sociedad

- Apoyar la conservación de la biodiversidad.
- Privilegiar el consumo de productos bio y que cuenten con sellos ambientales.
- Participar en plataformas de interacción y coordinación sobre bioeconomía.
- Impulsar innovación en centros tecnológicos y academia.

Foro Nacional de Bioeconomía 2017

Otro trabajo realizado en el 2017 como fruto de la cooperación del Cirad con Colciencias y otros socios, y haciendo parte de varios proyectos europeos, fue formulado en su Foro Nacional de Bioeconomía (Henry *et al.*, 2017). La siguiente hoja de ruta para la bioeconomía colombiana está enfocada en las acciones regulatorias y económicas/sociales para cada uno de los seis senderos propuestos:

Tabla 1. Acciones requeridas por sendero de la bioeconomía

Sendero	Regulatorio	Económica/comercial	Instrumentos habilitantes
Valoración de la biodiversidad	a) Revisión del marco nacional acceso a recursos genéticos	Realización de estudios sectoriales de mercado (cosméticos, fármacos, extractos biológicos, cosméticos) que determinen potenciales de mercado con fines de exportación.	Alianzas público-privadas. Generación de fondos para apoyar el desarrollo de *start-up*. Financiamiento y capital de riesgo. Incentivos fiscales y tributarios. Implementación de capacidades de escalamiento.
	b) Racionalización del proceso con ventanilla única		
	c) Mejora de la predictibilidad y tiempos de procesos		
	d) Valoración de nuevos modelos de compensación justa y equitativa de beneficios de acuerdo con el Protocolo de Nagoya.		
	e) Definición del marco normativo para las New Breeding Techniques (NBT).		
Biorrefinerías y bioenergía	a) Cumplimiento de lo establecido por ley sobre volúmenes de mezcla para etanol y biodiésel.	Ejecución de evaluaciones de impacto económico y comercial por la ejecución de lo dispuesto en los tratados de libre comercio sobre importación de alcohol con arancel cero.	
	b) Expedición de la normatividad para motores Euro VI.		
	c) Normatividad para regular energía a partir de fuentes lignocelulosa, dendroenergía y algas.		

Sendero	Regulatorio	Económica/comercial	Instrumentos habilitantes
Ecointensificación: bioinsumos, agricultura orgánica, agricultura de precisión, alimentos funcionales.	a) Regulación del uso de la agricultura de precisión.	Estudios comparativos de costos sobre uso de agricultura de precisión, imagen satelital (imágenes obtenidas con drones de uso agrícola).	
	b) Adaptación o modificación de reglamentaciones existentes para que incluyan a las nuevas categorías de alimentos funcionales.		
Productos y procesos biotecnológicos.	a) Adaptación de las normas de insumos médicos a nuevos materiales. Bioplásticos, biochips, biosensores y enzimas.	Desarrollo de análisis de factibilidad técnica y económica que permitan determinar cuándo el nuevo material puede ser reemplazo de un material obsoleto o en desuso.	
Explotación sostenible de los recursos de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.	Adaptación y reflejo de la nueva realidad política del proceso de paz en Colombia para redefinir nuevas zonas y áreas de ecoturismo en el país.	Profundización de esquemas de incentivos financieros basados en experiencias de programas como fondos rotatorios y créditos.	Financiamiento y capital de riesgo. Incentivos fiscales y tributarios.
		Fortalecimiento y establecimiento de incentivos fiscales o tributarios a las reservas de la sociedad civil.	
		Creación de fondos para el apoyo a la transformación de productos (certificación, comercialización, estándares).	
		Mejora de la autosostenibilidad y la generación de mecanismos de financiación propios que eviten depender excesivamente de los donantes internacionales.	

Fuente: Henry *et al.* (2017)

Proyecto Bioeconomía para Colombia (SEI, 2019)

Como ya fue discutido en relación con la visión, el proyecto Bioeconomía de SEI formuló para cada de sus cuatro rubros las acciones correspondientes a la hoja de ruta, y que están resumidas a continuación (SEI, 2020)

Rubro agricultura

1. Crear o fortalecer redes institucionales con actores públicos y privados para la articulación de la bioeconomía en el sector.
2. Fortalecer capacidades para la transformación de la biomasa: investigación, transformación *in situ*, y buenas prácticas de producción.
3. Establecer un sistema de incentivos para un ecosistema empresarial favorable.
4. Desarrollo de empresas de base bioeconómica: empresas de base comunitaria, *spin-off* y modelos de negocio a mayor escala.
5. Intercambio de experiencias con programas exitosos en otros países (p. ej. Uruguay, Brasil).
6. Acompañamiento del gobierno para priorizar mercados y posicionar productos.
7. Monitoreo y seguimiento de desarrollo de la bioeconomía a través de indicadores.

Rubro bioquímica

1. Desarrollo y publicación de un vademécum bio de ingredientes naturales con potencial comercial.
2. Desarrollo de estudios de mercado para nuevas cadenas de valor.
3. Desarrollo e implementación de sellos ambientales, metrología y gestión de la calidad para cadenas consolidadas.
4. Portafolio Colombia biocosméticos.
5. Desarrollo e implementación de incentivos: instrumentos tributarios y de mercado, mejoras normativas.

Rubro bioenergía

1. Establecer estándares de sostenibilidad ambiental y social para el sector.

2. Crear cambios regulatorios para promover el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos y del sector agropecuario para la bioenergía.
3. Fomentar la transferencia de tecnología y el desarrollo de infraestructura para el sector.
4. Desarrollar tecnología financiera (*financial technology*) (*fintech*) para el sector, en donde el financiamiento provenga de los mismos actores (*stakeholders*).
5. Desarrollar la demanda de bioenergía a nivel nacional.

Rubro biofarmacéutica

1. Incentivos tributarios para impulsar la investigación y desarrollo como inversión y no como gasto.
2. Incentivos financieros para la empresa privada.
3. Investigación y desarrollo para identificar nuevos componentes activos para avances en fitofarmacéutica.
4. Cumplimiento de estándares internacionales en laboratorios de toxicología preclínica, para fomentar la innovación.
5. Incrementar la formación profesional y técnica a nivel nacional.

Las hojas de ruta de los tres proyectos discutidos coinciden en sus planteamientos con acciones generales propuestas en (1) necesidad de fortalecimiento de mercados nacionales e internacionales, a través de mejor información (estudios/análisis), a través de la adopción de estándares internacionales, y a través de incentivos y/o compras públicas nacionales etc.; (2) la organización de plataforma/comité/red de coordinación a nivel nacional y/o regional; (3) organización de fondos/capital de riesgo; (4) crear incentivos empresariales e impulsar innovaciones; (5) fortalecer capacidades, formación profesional, etc.

Un tema que en el que puso énfasis el Foro Nacional de Cirad/Colciencias son las acciones reglamentarias y normas, importantes en los seis senderos propuestos. Dos temas interesantes que se mencionaron son: un repositorio genético de referencia mundial y una actividad de monitoreo de la bioeconomía. Otro tema que tal vez necesitaría más énfasis y detalles es la

gobernanza (estructura, organización etc.). Al final, como fue discutido aquí, existen diferentes hojas de ruta, diferentes listas de recomendaciones y acciones propuestas, pero, ¿con quiénes y cómo se va a construir un consenso con el cual Colombia podría avanzar de una manera concreta y factible?

Condiciones requeridas para promover la bioeconomía en Colombia

La bioeconomía representa una estrategia de producción y organización económica que es transversal a todos los sectores productivos incluyendo no solamente los sectores modernos y de innovación, sino también los tradicionales (agricultura familiar, agroecosistemas de comunidades y pueblos originarios y otros), de diversas escalas de producción, que comparten el concepto del uso de los procesos y recursos biológicos como un componente central de sus actividades de producción y servicios (Cepal, FAO e IICA, 2019). Implica una oportunidad trascendental de innovación y apertura de nuevos senderos para robustecer y reactivar el sector agrícola y las áreas rurales, es decir, representa un motor para el desarrollo territorial inclusivo.

Para avanzar en el viraje hacia un modelo productivo sostenible y competitivo se requiere una visión clara y definida que cuente con un enfoque de prospectiva estratégica y planes de desarrollo e implementación a corto, mediano y largo plazo. Debe plantearse como un esfuerzo común en el que se acuerdan grandes soluciones para grandes problemas bajo el concepto de investigación-innovación orientada por la misión, y contando con la participación proactiva de todos los miembros de la sociedad (Misión Internacional de Sabios, 2020). Esta planeación y definición de actividades específicas debe ser fruto de formulaciones participativas en las que todos los actores involucrados contribuyan, además, debe contar con un respaldo sólido de políticas públicas estables a largo plazo. Lo anterior implica un cambio en las relaciones e interacciones intersectoriales, en las

que todos los actores participan, privilegiando el enfoque territorial sobre el nacional, ajustado a los recursos, capacidades, intereses y necesidades de cada región.

La bioeconomía no es solo una oportunidad para el país por su gran riqueza en biodiversidad, recursos genéticos, suelos productivos y capacidad de producción de biomasa, sino que es fundamental para encontrar nuevas rutas para el desarrollo rural y agrícola (Cepal-FAO-IICA, 2019). Para que el aprovechamiento productivo de la bioeconomía sea viable, factible y seguro para todas las agriculturas y sistemas rurales, se debe contar con las condiciones políticas, económicas y ambientales requeridas. Puesto que la bioeconomía se fundamenta en la biomasa, la agricultura es el elemento fundamental en este paradigma. El enfoque es hacer más eficiente la agricultura, producir más con menos y promover la agricultura circular, con utilización intensiva, adaptado a las condiciones y los recursos naturales, físicos, científicos e incluso culturales de los territorios específicos.

Puesto que, en general, en la mayoría de sus formas la biomasa es un recurso voluminoso y de muy bajo precio, cuyo transporte representa costos ambientales y económicos, lo más eficiente y conveniente es realizar los procesos de adición de valor *in situ*, o a distancias cercanas a su origen, especialmente cuando se busca desarrollar nuevas cadenas o redes de valor en procesos asociados a esa biomasa (Cepal-FAO-IICA, 2019). La aplicación de avances en C & T + I en esas redes de valor permiten el proceso en cascada de la biomasa para la obtención de alimentos y piensos, fibras, energía, biomateriales y otros bioproductos de alto valor agregado. Como resultado de esto se logra una densificación económica regional que a su vez promueve el desarrollo de una mejor infraestructura y bienestar para la región (vías, comunicaciones, educación, salud, empleo digno, entre otros)

Es necesario renovar las estrategias de inserción de las economías y los territorios rurales en la economía global, y definir nuevos senderos productivos a partir de lo biológico, que generen empleos e ingresos con los recursos del entorno. Uno de los ejemplos es el uso de la biomasa residual (agrícola, industrial y doméstica) en aprovechamientos productivos usando C & T + I para la innovación mediante la obtención de bioenergías, bioinsumos, productos para alimentación humana y animal

y biopolímeros e insumos entre otros. Además, debe tenerse en cuenta la dinámica actividad de los emprendedores jóvenes en este campo a través de bioemprendimientos pioneros promotores de innovación, especialmente en temas de frontera del conocimiento.

Elementos primordiales para el fomento del modelo de bioeconomía circular:

- La transferencia de conocimiento y la colaboración empresarial son el núcleo de un sistema de innovación, base del desarrollo de la bioeconomía y de nuevas aplicaciones para la biomasa. Es necesario estimular y fortalecer la colaboración entre las empresas en las etapas, de manera que se estructuren verdaderas redes de innovación.
- La definición en forma eficiente y en cascada los flujos de biomasa para la reducción de desechos (subproductos).
- El establecimiento de redes y aplicación del conocimiento para el desarrollo de nuevos bioproductos.
- La promoción de actividades de comunicación y divulgación para la sensibilización de toda la sociedad sobre la necesidad y beneficios del modelo de bioeconomía.

Etapas a seguir y recomendaciones

- El éxito de la adopción de la bioeconomía requiere un discurso social sobre cómo la sociedad puede reconciliar crecimiento económico y la sostenibilidad, para lo cual se necesita adaptación y ajuste permanente de iniciativas y agendas, así como de cooperación internacional eficiente.
- Es urgente y prioritario que en el actual proceso de revisión y concertación del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad, la concepción que se tiene de bioeconomía sea revisada de fondo y el país pueda beneficiarse de las enormes posibilidades que esta ofrece en campos como la

agricultura y el desarrollo rural, la salud humana y animal, el ambiente y la descarbonización de la economía y la generación de energías limpias, entre otras. De no hacerlo el país y el Gobierno perderán una oportunidad de oro para generar riqueza y bienestar basados en el conocimiento y la innovación como motores de las sociedades del conocimiento.

- Debe integrarse una comisión de expertos internacionales y nacionales de reconocida solvencia científica y tecnológica para que apoye y colabore en el país con dichas materias.
- De alta prioridad sería constituir un Consejo Nacional de Bioeconomía, que tendrá como una primera acción corregir y adecuar la estrategia de la bioeconomía y comenzar la grande tarea de sensibilizar a la sociedad civil, en las diferentes regiones y territorios del país.
- Una primera etapa para lograr una adopción del modelo de la bioeconomía por parte de la sociedad civil colombiana es elaborar e implementar una estrategia de sensibilización: explicar el modelo, sus principios, sus aplicaciones, productos e impactos. Justo en este momento de choque por la pandemia de COVID-19, la sociedad en general se está dando cuenta de que pos-COVID "business as usual" ya no es más posible, ni aconsejable. Como recién comentó el "padre de la bioeconomía europea", Christian Patermann (2020):

> from all existing strategies to cope with the post-Corona future, the Bio-based Economy is the best one to reconcile the fundamental desires of the people for affordable living, decent working with respecting nature and environment, in a sustainable co-existence...[1]

1 De todas las estrategias disponibles para enfrentar el futuro pos-COVID, la bioeconomía es la mejor opción para reconciliar los objetivos fundamentales de una vida factible y trabajo digno en una coexistencia sostenible con el respeto a la naturaleza y el ambiente [traducción propia].

- Una etapa complementaria siguiente requiere la elaboración e implementación de una estrategia de formación enfocada a diversos públicos. Esto incluye cursos especializados para industrias, posgrados multidisciplinarios para diferentes carreras universitarias, así como seminarios y talleres para grupos interesados y/o grupos de actores cuyo objetivo es instaurar una bioeconomía territorial... Por otro lado, es importante sensibilizar y educar a los consumidores en general sobre los beneficios de los (nuevos) bioproductos. El papel de las agencias de consumidores es significativo y la complementación a través de instancias como Consumers International puede ser oportuno.
- Adicionalmente, y de acuerdo con los análisis globales iniciales del pos-COVID-19, parece haber consenso en que una de las lecciones más evidentes es la importancia fundamental de la producción y comercio (de agroalimenticia) a nivel local y regional, lo cual se traduce en el enfoque de bioeconomía que proponemos, es decir, un modelo de desarrollo territorial. Es un hecho que la agricultura y la alimentación van a ser consideradas actividades estratégicas de interés público nacional y que probablemente van a contar con más apoyo no solo de todos los órganos del Estado, sino también de toda la sociedad en general. Se plantea el fortalecimiento y la integración a nivel local de los diversos sistemas productivos y la adición de valor a los recursos en un contexto de sostenibilidad social, ambiental y económica. Se trata de interconectar diversas actividades productivas y económicas y así establecer verdaderas redes de valor de los productos para su valorización *in situ* con los consiguientes beneficios para las comunidades y empresas así como para el bienestar de la población.
- La mejor alternativa para la definición de estrategias y soluciones en este tipo de desarrollo y afianzar sus posibilidades de éxito es la acción participativa y proactiva de todos los actores involucrados a partir de la base, es decir, la denominada *bottom up* porque es la comunidad misma la que conoce sus características, sus recursos, sus capacidades, sus productos estratégicos que le pueden dar

competitividad y, también conocen cuáles son las actividades que pueden facilitar emprendimientos exitosos que generen empresas estables y sostenibles que proporcionen prosperidad, salud y empleo para quienes han visto reducidas sus fuentes de ingresos.

Referencias

Aramendis, R. y Castaño, A. (2019). Bioeconomía en Colombia. En E. Hodson de Jaramillo, E. Trigo y G. Henry (eds.), *La bioeconomía: nuevo marco para el crecimiento sostenible en América Latina* (pp. 81-101). Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (Cepal), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2019). Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020. https://www.cepal.org/es/publicaciones/45111-perspectivas-la-agricultura-desarrollo-rural-americas-mirada-america-latina

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). Conpes 3934 Política de Crecimiento Verde. https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Resultados/PDF_Colombia%20hacia%20el%20 crecimiento%20verde_MP.pdf

European Commission. (2018). A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment. Updated Bioeconomy Strategy. https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/ec_bioeconomy_strategy_2018.pdf

Global Bioeconomy Summit (GBS). (2018). Communiqué. Global Bioeconomy Summit 2018 - Innovation in the Global Bioeconomy for Sustainable and Inclusive Transformation and Wellbeing. http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Communique.pdf

Henry, G., Aramendis, R. y Hodson de Jaramillo, E. (En prensa). *La bioeconomía: una asignatura pendiente en la política pública colombiana*. Editorial Universidad Externado.

Henry, G., Hodson, E., Aramendis, R., Trigo, E. J. y Rankin, S. (2017). La bioeconomía: motor de desarrollo integral para Colombia. CIAT. http://hdl.handle.net/10568/90548

Keswani C. (ed). (2020). *Bioeconomy for sustainable development*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9431-7

Misión Internacional de Sabios. (2020). Reflexiones y propuestas de reformas del Foco de Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente. En AA. VV., *Colombia - Hacia una sociedad del conocimiento. Reflexiones y propuestas (vol. I)*. Colección Misión Internacional de Sabios 2019. Vicepresidencia de la República de Colombia, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Montoya Castaño, D. (2019, 2 de marzo). Bioeconomía: un camino al desarrollo sostenible. *El Espectador*.

Patermann, C. (2020). Comment. https://www.linkedin.com/in/christian-patermann-80599975/

Pisón, A. C. y Betancur, M. A. (2014). Experiencias exitosas en bioeconomía en América Latina y Caribe. En E. Hodson (ed), *Towards a knowledge based bioeconomy in Latin America and the Caribbean*. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

Rodríguez A. G. (2018). La bioeconomía y la agenda 2030. Cuarto Diálogo Latinoamericano sobre Agricultura y Cambio Climático. Consejo Económico para América Latina y el Caribe. Cepal. Santiago de Chile. Noviembre.

Stockholm Environment Institute (SEI). (2020). Informe del taller Diálogo nacional de bioeconomía en Colombia, Bogotá, 18 de noviembre del 2019.

Una revolución verde. (2016, 25 de junio). *Revista Semana*. https://www.semana.com/economia/articulo/bioeconomia-nuevo-negocio-para-biodiversidad-en-colombia/479156

World Economic Forum. (2018). Harnessing the fourth industrial revolution for life on land: Towards an inclusive bio-economy. Fourth Industrial Revolution for the Earth Series. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Harnessing_4IR_Life_on_Land.pdf

Epí

Reflexiones sobre ciencia en tiempos de pandemia

Ludger Wessjohann

Traducción de Jaime Velásquez

Logo

Vivimos en tiempos de cambio rápido, y podríamos preguntarnos ¿por qué los científicos escriben recomendaciones para las próximas dos décadas, con el fin de (con suerte) apoyar e influir positivamente en las decisiones políticas? La vida de una noticia o de un tuit es de un día o dos. Las aplicaciones y los teléfonos inteligentes duran pocos años, el horizonte de algunas decisiones políticas es solo hasta las próximas elecciones, y el de muchos empresarios hasta el próximo informe anual.

Pero podría argumentar esto: ¿Por qué construyes una casa o compras un apartamento? ¿Por qué los agricultores plantan árboles que dan fruto solo después de varios años? ¿Por qué las universidades y la industria farmacéutica invierten en la investigación de medicamentos (compuestos bioactivos) que tardarán veinte años en comercializarse, pero que muy probablemente fracase en el camino? ¿Y por qué te casas o envías a tus hijos a la escuela por más de cinco años?

La actual crisis del coronavirus es un ejemplo perfecto de la importancia del trabajo y el asesoramiento científico constante, pero también de las limitaciones de las recomendaciones científicas y su transformación dentro de la política.

Los científicos no sabíamos mucho del virus SARS-CoV-2 cuando apareció, pero era claro para la ciencia que algo así llegaría luego del SARS y el MERS, como fue publicado hace muchos años (Vincent *et al*., 2007). Se les advirtió a los políticos, especialmente en China, lo que incluso culminó

en capacitaciones y simulacros de respuesta a una pandemia (por ejemplo, en Alemania), aunque esto ayudó poco. Por lo tanto, el coronavirus no es un cisne negro, es solo un cisne gris (a las catástrofes que afectan negativamente a los mercados de una manera impredecible se les llama sucesos del "cisne negro").

En los últimos meses, la ciencia proporcionó rápidamente cada vez más información, y más segura, en el caso de corona2/COVID, en momentos en los que aún no era efectiva ninguna financiación especial para el coronavirus. ¿Por qué fue eso posible? ¿Por qué sabíamos cómo se propagan las infecciones, cómo intubar a las personas, por qué el remdesivir estaba disponible? No por una reacción al coronavirus, sino por una constante inversión en ciencia básica (gobierno) y aplicada (compañías) y su desarrollo antes de que surgiera esta crisis. Las pruebas reacción en cadena de polimerasa (PCR) para medir la carga viral se desarrollaron antes del coronavirus, porque alguien lo financió hace años. En el momento del descubrimiento de la PCR, seguramente era una ciencia básica exótica sobre la replicación del ADN. Pero también porque alguien desarrolló la síntesis química del ADN, que más tarde se requirió para los cebadores de PCR; porque los ingenieros de una compañía construyeron hace años síntesis de ADN y máquinas de PCR; y porque los laboratorios de diagnóstico invirtieron en el equipo antes de que apareciera el coronavirus.

En el camino hacia un mayor conocimiento del coronavirus, hubo algunos errores debido a la falta de datos. Pero sin la ciencia y la tecnología, la situación sería mucho peor (sin comprensión de la infección, sin pruebas disponibles, sin opciones de tratamiento, etc.), y si las decisiones políticas ignoran las recomendaciones científicas (por imperfectas que sean), las cosas empeoran aún más, y se ponen en peligro la vida y la riqueza de las sociedades modernas. Basta con contrastar los países que escucharon con los que no lo hicieron. Estos aprendieron o todavía aprenden de la manera difícil; la ignorancia de la ciencia no funciona, ¡el virus ama la ignorancia!

Actualmente, el reflejo de los políticos es destinar todo el dinero disponible a la investigación del virus y a los planes de acción contra la pandemia. Algo de esto tiene sentido, pero no en la medida en que eso pone en peligro el futuro de la ciencia y el apoyo al desarrollo en un aspecto

más general durante muchos años por venir, en el sentido de que obtiene los fondos que eran para otros objetivos importantes y más a largo plazo. El próximo "cisne negro" de Colombia probablemente no sea un virus; puede ser un terremoto, inundaciones, sequías severas en los llanos que aumentan a lo largo de décadas debido a la pérdida de bosques, o una guerra con Venezuela, o una cepa de malaria que se está propagando y es resistente a los fármacos y al frío. ¿Quién lo sabe? ¡Nadie!

Por lo tanto, es importante tener una agenda, un plan para el largo plazo. Un plan que mejore la capacidad general y la resiliencia del sistema científico colombiano a lo largo de los años y los consiguientes resultados científicos, sociales y económicos que dependen de este. Esto debe hacerse de manera independiente de la incidencia de un impredecible cisne negro. Solo se puede tener una mayoría de cisnes blancos (desarrollos positivos) si se invierte constantemente en ellos. O para seguir con la analogía: si construyes una casa, no inviertes todo tu dinero en una sola pared, solo porque parte de ella se haya derrumbado. Puedes reforzar el punto débil, pero seguirás con la construcción planeada, cuidando que especialmente los cimientos sean mejorados y seguros, de modo que los impactos futuros sean minimizados y no afecten todo el edificio. ¡El plan dado por la misión es el plano de dichos cimientos!

Los problemas progresivos, los que no son visibles inmediatamente, durarán mucho más que cualquier periodo de gobierno, pero son mucho más peligrosos para el bienestar de Colombia que los incidentes aislados como las crisis del coronavirus (o del Zika hace unos años, podemos recordar lo que paso con él). Los problemas progresivos no son buenos titulares o pocas veces logran llegar a los medios, como la falta de educación o el fracaso en el desarrollo regional. Se nota la pérdida de biodiversidad, pero se convierte en la nueva normalidad. Incluso el cambio climático, la mayoría de las veces, aparece solo en los titulares si ocasionalmente hay efectos meteorológicos severos, pero es al menos más visible porque tiene un potencial de destrucción del planeta. A la larga, las consecuencias de estos y otros problemas de lento crecimiento serán más severas que múltiples crisis de coronavirus al tiempo.

Como científicos, estudiamos nuestro medio ambiente, la naturaleza, las personas, todo. A largo plazo. Estudié ciencias naturales, y finalmente me especialicé en química, porque estaba y sigo estando fascinado por las maravillas de la naturaleza. Y Colombia está repleta de tales maravillas; de hecho, es abrumadora en este sentido. Por ello, temo más aún por las amenazas que sufren, que para mí son más alarmantes que el coronavirus. Así, al ser parte de la misión, se convirtió en mi preocupación personal el hecho de contribuir al uso sostenible de la riqueza natural de Colombia; pero, como químico, también tengo una tendencia al desarrollo industrial y la economía. Ciertamente, no es ni será posible tener un desarrollo regional y económico positivo sin repercusiones en la naturaleza. También las áreas designadas como parques nacionales, aunque estén bien protegidas, no pueden sustituir un sistema general de uso sostenible. Por otra parte, no todas las necesidades de la humanidad pueden ser satisfechas con procesos 100 % sostenibles, y no todo lo que es sostenible también preserva la biodiversidad. Así que hay conflictos que pueden ser resueltos, y, en el foco en el que participé (Bioeconomía, Biotecnología y Medio Ambiente), causó un gran dolor de cabeza pensar en cómo unir los dos extremos (desarrollo y preservación de la biodiversidad) para evitar desarrollos negativos para Colombia como los vistos en algunas partes del Sudeste Asiático o África. La ciencia y las decisiones políticas y económicas sabias pueden ayudar a minimizar estos conflictos y a curar los que son inevitables en el futuro cuando sepamos más.

Halle, 1.º de julio del 2020

Referencia

Vincent, C., Cheng, C., Susanna, K., Lau, P., Patrick, C., Woo, Y. y Kwok Yung Yuen. (2007). Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus as an Agent of Emerging and Reemerging Infection. *Clinical Microbiology Reviews*, 20 (4), 660-694.

LOS AUTORES

Alejandro Gaviria Uribe

Rector de la Universidad de los Andes

Ingeniero civil de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, magíster en Economía de la Universidad de los Andes y doctor en Economía de la Universidad de California, San Diego. Es profesor asociado de la Universidad de los Andes, donde fue decano de la Facultad de Economía durante seis años. Se desempeñó como Ministro de Salud y Protección Social entre el 2012 y el 2018, fue subdirector del Departamento Nacional de Planeación y de Fedesarrollo, ha sido investigador del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y consultor del Banco Mundial. Ha recibido diversos reconocimientos, como la Medalla Juan Luis Londoño, el Premio de Periodismo Simón Bolívar al Mejor Artículo de Opinión y la Orden de Boyacá, máxima condecoración que el Gobierno colombiano concede a sus ciudadanos destacados por los servicios prestados al país.

Esteban Manrique Reol

Director del Real Jardín Botánico de Madrid del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Se licenció en Biología por la Universidad Complutense de Madrid y se doctoró en Biología por la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid en 1979. Ha sido profesor titular de Biología General y Botánica en la Universidad Complutense de Madrid. Actualmente es profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Entre otros cargos de gestión científica ha sido subdirector general de Promoción del Conocimiento y director del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.

Federica di Palma

Profesora de la Universidad de East Anglia, en el Reino Unido, y fundadora y directora de Science is Global, Strategy and Consulting. Le apasiona

explorar y preservar la biodiversidad alrededor del mundo. Lidera varios programas de investigación multidisciplinarios que usan la aproximación genómica para entender cómo las presiones evolucionarias y ambientales han modelado la diversidad de las especies de vertebrados, con implicaciones sobre la comida, el medio ambiente y los modos de vida. Es científica visitante en el Instituto Earlham, donde fue directora de Ciencias, y en el Instituto Broad en Cambridge (Massachusetts, Estados Unidos), donde fue directora asistente del Programa de Biología del Genoma de Vertebrados.

Germán Poveda

Ingeniero civil, M. Sc. y Ph. D. en Ingeniería de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, en donde actualmente es profesor titular. Hizo un M. Sc. en Ingeniería en la Universidad de California, Davis, y un posdoctorado en Hidroecología en la Universidad de Colorado, Boulder. Desde 1990 ha sido miembro integral del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), organización mundial de científicos que ganó el Premio Nobel de Paz en el 2007. Es miembro de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). Ha sido ganador en cuatro oportunidades del primer premio de la Fundación Alejandro Ángel Escobar: en 1999 en la categoría de Ciencias Exactas, y en el 2000, 2007 y 2019 en la categoría de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, y tiene tres menciones de honor. Actualmente hace parte del comité de dirección científica del Panel Científico por la Amazonia.

Sandra Baena Garzón

Doctora en Ciencias de la Universidad de Provence, Aix-Marseille I (Francia), magíster en Saneamiento y Desarrollo Ambiental de la Pontificia Universidad

Javeriana y bióloga de la Universidad Javeriana. Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). Es Profesora titular del Departamento de Biología de la Universidad Javeriana. Miembro fundador de la Unidad de Saneamiento y Biotecnología Ambiental (USBA) de la Pontificia Universidad Javeriana. Líneas de investigación: Ecología y diversidad microbiana de manantiales termales y salinos de Colombia. Biotecnología industrial enfocada al aprovechamiento de la diversidad microbiana.

Carmenza Duque Beltrán

Química de la Universidad Nacional de Colombia. Hizo estudios de especialización en Química Analítica Instrumental en 1977 y un Doctorado en Ciencias en 1980 en la Universidad Tecnológica de Tokio. Actualmente es profesora emérita de la Universidad Nacional de Colombia e investigadora emérita del Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia. En los últimos cinco años ha ocupado posiciones tales como la Dirección Ejecutiva de la Corporación Centro de Excelencia en Ciencias Marinas (CEMarin) en Colombia y la Vicepresidencia de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). Durante el 2019 y lo que va corrido del 2020 ha sido participante de la Misión Internacional de Sabios en el área de Ciencias Básicas y del Espacio. Ha dedicado su vida a la enseñanza de la química y a la investigación científica en química de productos naturales en frutas y organismos marinos en la Universidad Nacional de Colombia. Ha formado innumerables estudiantes de pregrado, maestría y doctorado, y es pionera y gestora de dos de los grupos de investigación en productos naturales con alto potencial de aprovechamiento en bioeconomía que actualmente funcionan en Colombia. Tiene alrededor de 150 publicaciones científicas y ha sido merecedora de un sinnúmero de premios y reconocimientos a sus trabajos de investigación y a su vida y obra.

Silvia Restrepo Restrepo

Profesora titular del Departamento de Ingeniería Química y de Alimentos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Actualmente es la vicerrectora de Investigación y Creación de la misma universidad. Miembro de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). Miembro de la Misión Internacional de Sabios 2019. Miembro del comité científico del Instituto von Humboldt. Orden del Mérito otorgado por el Gobierno francés.

Bióloga de la Universidad de los Andes con maestría y doctorado de la Universidad Pierre et Marie Curie, París VI. Tiene un Doctorado en Fitopatología. Trabajó como asistente posdoctoral en la Universidad de Cornell y en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Markus Eisenhauer

Psicólogo, informático y doctor en Psicología Cognitiva de la Universidad de Trier, Alemania.

Desde el 2001 labora en el Instituto Fraunhofer de Tecnología de la Información Aplicada (FIT) y lidera el Departamento de Investigación de Computación Centrada en el Usuario, Enfocado en Computación Ubicua, Internet de las Cosas, Sistemas Embebidos y Ciberfísicos, Usabilidad y Conformidad en la Web. Coordinador de grandes proyectos europeos, ha participado en múltiples proyectos con financiación alemana y europea. Presidente de un programa de conferencias internacionales y editor de revistas científicas. Experto para la Comisión Europea, responsable de Relaciones Internacionales del Clúster Future Internet Enterprise Systems (FInES).

María del Pilar Noriega Escobar

Ingeniera química de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín; doctorada en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Wisconsin-Madison, Estados Unidos. Tiene posgrados en Química de la Universidad Técnica de Dresde y Extrusión de Polímeros del Instituto de Tecnología del Plástico, Universidad de Stuttgart, Alemania. Es coautora de cinco libros y múltiples artículos en revistas internacionales, coinventora de patentes de invención: cuatro otorgadas en Colombia, tres otorgadas en Estados Unidos, cuatro solicitudes de patente internacionales, una solicitud de patente en Colombia. Es asesora del Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho, donde ha laborado desde 1993, del que fue directora general del 2012 al 2019.

Guy Henry

Agroeconomista, con Ph. D. de Texas A&M University, trabajo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colombia, como líder de economía en el Programa de Yuca. Luego, con el Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) de Francia, fue expatriado en Brasil, Argentina y Colombia. Sus temas de investigación birregional incluyeron cadenas de valor, competitividad, política de comercio internacional, sistemas alimentarios sostenibles y política alimentaria urbana. Pionero del tema de la bioeconomía en la región de América Latina y el Caribe y coordinó diferentes proyectos entre la Unión Europea y América Latina y el Caribe al respecto. Luego, como expatriado en el CIAT, montó el programa de Sistemas Alimentarios Sostenibles y fue el representante del Cirad. Recién volvió a Colombia como delegado para América Latina.

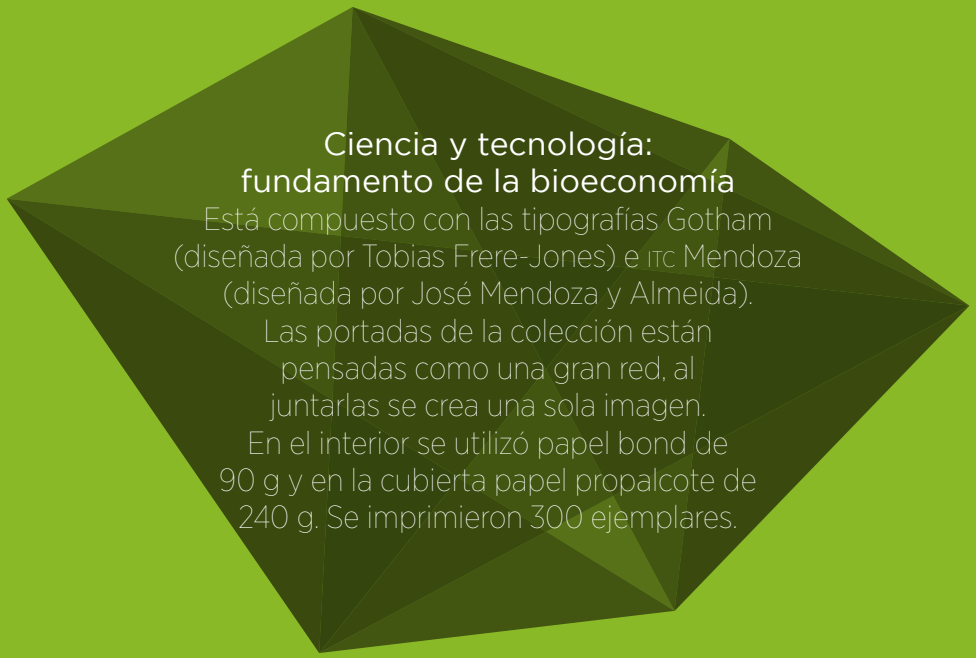
Elizabeth Hodson de Jaramillo

Profesora emérita de la Facultad de Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia); miembro de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN); miembro honorario del Comité Científico de la Fondazione Scuola Medica Salernitana (Italia); miembro del Ad Hoc Technical Expert Group (AHTEG) en Evaluación y Manejo de Riesgo del Protocolo de Cartagena en Bioseguridad

(Convenio de Diversidad Biológica); miembro de la Comisión en Ética del Conocimiento Científico y Tecnología (Comest) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco); miembro de la Misión Internacional de Sabios Colombia 2019, Cátedra IICA en Bioeconomía y Desarrollo Sostenible. Ph. D. de la Universidad de Nottingham en Botánica y Manipulación Genética de Plantas. Consultora internacional en agrobiotecnologías y bioseguridad de los organismos genéticamente modificados (OGM), en biodiversidad y en bioeconomía.

Ludger Wessjohann

Es profesor y director del Leibniz Institute of Plant Biochemistry y del Departamento y grupo de investigación en Química Bioorgánica. Estudió química en Alemania, el Reino Unido y Noruega, e hizo su residencia posdoctoral en la Universidad de Stanford. Se ha especializado en el análisis, síntesis y aplicación de productos naturales y derivados, y tiene 270 publicaciones y 20 patentes. Es el co-fundador de cuatro compañías y ha recibido varios reconocimientos, como el Microsoft IT Founders Award y la membresía honoraria en la Sociedad Argentina de Química Orgánica Sintética.



Ciencia y tecnología:
fundamento de la bioeconomía

Está compuesto con las tipografías Gotham
(diseñada por Tobias Frere-Jones) e ITC Mendoza
(diseñada por José Mendoza y Almeida).
Las portadas de la colección están
pensadas como una gran red, al
juntarlas se crea una sola imagen.
En el interior se utilizó papel bond de
90 g y en la cubierta papel propalcote de
240 g. Se imprimieron 300 ejemplares.

Este tercer volumen de la Misión Internacional de Sabios reúne los aportes del Foco de Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente. Además, presenta distintas maneras de conciliar los objetivos económicos, sociales y medioambientales en una propuesta de transformación productiva, desarrollo social y sostenibilidad. Este volumen colectivo, en el que participan muchos de los más importantes científicos colombianos en el área, muestra que la bioeconomía es una alternativa viable, no solo para garantizar el crecimiento económico, sino también el progreso social y la conservación. Sugiere, en últimas, una agenda esperanzadora para el futuro de Colombia.

9 789588 290966