

TRANSICIÓN ENERGÉTICA, PRODUCTIVIDAD Y SOSTENIBILIDAD

Foco de energías sostenibles

Volumen 10



El futuro
es de todos

Gobierno
de Colombia

MISIÓN DE **SABIOS**



TRANSICIÓN ENERGÉTICA, PRODUCTIVIDAD Y SOSTENIBILIDAD

Foco de energías sostenibles

Misión de Sabios, Colombia
Bucaramanga, 2019

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

Eduardo Posada Flórez (Colombia)
Ángela Cadena (Colombia)
Jefferson D. Ochoa Ojeda (Colombia)
José M. Rincón Martínez (Colombia)
Alain Gauthier (Colombia)
Fernando Jiménez (Colombia)
Guillermo Jiménez (Colombia)
Javier E. Solano (Colombia)
Gabriel Ordóñez Plata (Colombia)
Gonzalo Ordóñez (Colombia)
Yovany E. Portilla Portilla (Colombia)
Angie J. Martínez Amaya (Colombia)
Horacio Torres (Colombia)

José F. Izasa Delgado (Colombia)
Ángela Wilkinson (Reino Unido)
Farid Chejne J. (Colombia)
Nicanor Quijano (Colombia)
Roberto Bustamante (Colombia)
Juan G. Ramírez (Colombia)
Juan C. Oviedo (Colombia)
César E. Duarte Gualdrón (Colombia)
Rodolfo Villamizar (Colombia)
Karen J. Cepeda Cepeda (Colombia)
Rafael E. Chona Perea (Colombia)
Humberto Rodríguez (Colombia)

Coordinador
Juan Benavides (Colombia)

Editores
Dionisio Antonio Laverde Cataño (Colombia)
Iván David Serna Suárez (Colombia)

Primera edición, 2020
ISBN digital: 978-958-5135-05-5

Edición y corrección de estilo
División de Publicaciones UIS

Diagramación
División de Publicaciones UIS

Impreso y hecho en Bucaramanga, Colombia

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

1.	<i>CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN</i>	<i>11</i>
	RETOS Y OPORTUNIDADES	12
	PROPUESTA DE UN CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN SISTEMAS DISTRIBUIDOS	36
2.	<i>EDUCACIÓN E INVESTIGACIÓN</i>	<i>43</i>
	EDUCACIÓN PARA UNA SOCIEDAD SOSTENIBLE Y EN PAZ	44
	EDUCACIÓN EN INGENIERÍA PARA EL SIGLO XXI	58
3.	<i>INEQUIDAD TERRITORIAL Y ZONAS NO INTERCONECTADAS</i>	<i>65</i>
	ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LAS ZNI EN COLOMBIA	66
	CONCEPTO DE EQUIDAD TERRITORIAL	78
	LA INEQUIDAD TERRITORIAL EN COLOMBIA	85

conte

4. <i>ENERGÍAS SOSTENIBLES</i>	91
BIOMASA Y CARBÓN	92
ENERGÍA QUÍMICA SOSTENIBLE PARA LOS RETOS DEL PAÍS	128
LA ENERGÍA NUCLEAR EN COLOMBIA, UNA OPORTUNIDAD SIN EXPLOTAR	158
HIDROELECTRICIDAD	142
ENERGÍA MAREOMOTRIZ	147
HIDRÓGENO: EL VECTOR ENERGÉTICO DEL MAÑANA	153

enido

Prefacio



El foco de energías sostenibles de la Misión Internacional de Sabios 2019 contó con la amable colaboración de muchos especialistas. Se realizaron sesiones de discusión y se solicitaron documentos para disponer de un espectro amplio de opiniones que sirviera de insumo para preparar el informe y las recomendaciones de este tercer tomo.

Los documentos compilados incluyen las opiniones de un gran número de autores, que los editores, Dionisio Laverde e Iván Serna, han agrupado en cuatro capítulos: ciencia, tecnología e innovación (CTeI), educación e investigación, inequidad territorial y zonas no interconectadas y energías sostenibles. Los análisis comprenden desde recomendaciones en política hasta perspectivas de algunas tecnologías que podrían usarse en el mediano y largo plazo. Eduardo Posada, José Fernando Isaza y Angela Wilkinson, miembros del foco, contribuyeron de manera entusiasta con sus puntos de vista e invitaron a muchos de los demás autores a colaborar con insumos.

Este prefacio se escribe en el contexto de la pandemia del coronavirus. Las energías limpias y la recuperación verde hacen parte de las iniciativas de recuperación económica de muchos países no solo porque ayudarán a dinamizar el empleo y la generación de tecnología, sino también porque ayudarán a aumentar la resiliencia de la economía y la reorganización de la vida ciudadana en el largo plazo.

De manera preocupante, la estrategia de recuperación que propone el Gobierno se concentra en sectores intensivos en mano de obra no calificada, sin aprovechar la oportunidad de empujar cambios factibles, como los que se pueden lograr, por ejemplo, con nuevas tecnologías y modelos de negocio energéticos. Esperemos que estos asuntos se puedan rectificar a tiempo, de manera consistente con una estrategia de CTel y de crecimiento económico de largo plazo.

**Ciencia,
tecnología e
innovación**

Retos y oportunidades

La ciencia, la tecnología y la innovación presentan una dinámica acelerada en el ámbito mundial, y, en ese contexto, Colombia se encuentra en transición de convertirse en un país moderno que pretende construir un portafolio diversificado de alternativas sectoriales competitivas y cada vez más sofisticadas.

Esto no se logrará sin que la ciencia y la tecnología lleguen a un porcentaje creciente de la población, sin abrir espacios de participación concertada y sin una apropiada educación para el desarrollo tecnológico, sociocultural y económico.

Las estrategias identificadas por el ahora Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias, anteriormente Colciencias) pretenden fomentar la apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación (CTeI) en Colombia, estimulando la creación y fortaleciendo espacios para la comprensión, la reflexión y el debate de soluciones a problemas sociales, políticos, culturales y económicos, a fin de levantar y consolidar la generación y el uso de los conocimientos científico y tecnológico, que hoy juegan un papel importante.

Sin embargo, la falta de articulación entre los actores de este sistema hace que la situación de la investigación sea realmente crítica en Colombia, aun comparada con la de América Latina. El apoyo del Gobierno a la CTeI es muy escaso, en comparación con otros países. La importancia del conocimiento es palpable, pero no parece serlo para las firmas y la sociedad colombiana. Desarrollar la investigación requiere formar

doctores y contar con financiamiento continuado (mínimo de 3 años, periodo que corresponde al tiempo mínimo de formación de un doctor) y de largo plazo (en este caso, es necesario superar los periodos fiscales de las entidades públicas y la dificultad de solicitar vigencias futuras).

El país necesita una política pública que se desarrolle y se aplique, para que posibilite la apropiación de la CTel en la sociedad. Para ello es necesario buscar alternativas de alto impacto que brinden soluciones a los problemas caracterizados en los últimos años; además, estas alternativas deben estar soportadas en sólidos diseños y estrategias de apropiación. En este aspecto, la revolución 4.0 y las tecnologías que la habilitan, junto con la investigación en ciencias básicas, forman un campo de actuación estratégico para Colombia.

Revolución 4.0

Gracias al avance de la ciencia y la tecnología en los últimos años, es cada vez más fácil para los países en vía de desarrollo acceder a componentes y materiales de alta tecnología, con los cuales es posible diseñar y desarrollar equipos diversos para muy variadas aplicaciones, dado que los insumos más importantes son información y talento. Colombia forma excelentes físicos, ingenieros mecánicos, ingenieros eléctricos, ingenieros electrónicos e ingenieros de sistemas, entre otros profesionales, que tienen la capacidad y la información requeridas para garantizar el diseño y la producción de equipos de muy alta calidad para el sector de la energía.

El auge reciente de la “internet de las cosas” va exactamente en esa dirección y abre oportunidades extraordinarias en ese sentido, al igual que la economía naranja propuesta por el Gobierno, la cual parte de la idea de que las empresas de alta tecnología caben perfectamente en la denominación de industrias creativas.

A su vez, campos como la electrónica de potencia, la instrumentación industrial, la domótica o la energía solar están perfectamente a nuestro alcance. De hecho, en las universidades y los centros de investigación ya existen prototipos muy variados de equipos en cuya construcción han participado esos campos.

No obstante, la industria tradicional del sector no confía en los desarrollos locales, y prefiere adquirir tanto los equipos como la tecnología en el mercado internacional, a pesar de que, como se ha demostrado en muchos casos, la tecnología desarrollada en el país puede ofrecer la misma calidad y estar mejor adaptada a las condiciones locales, como temperatura, humedad, presión atmosférica y topografía. No será fácil lograr que la producción nacional sea considerada en el sector productivo; por eso, mientras se consolidan el mercado nacional y las posibilidades de exportación de ese tipo de productos a países vecinos, vale la pena continuar diseñando equipos en Colombia y solicitando su fabricación en otros países, como China y Malasia, con el propósito, a más largo plazo, de desarrollar una capacidad nacional de producción.

El primer paso hacia esta realidad es obvio: se debe proponer un programa para el desarrollo de la industria de producción de equipos para el sector eléctrico y electrónico. Por lo tanto, simultáneamente se debe consolidar una política de apoyo a la creación de empresas de base tecnológica, con énfasis en los sectores de la energía y de la electrónica, estableciendo incubadoras y aceleradoras de empresas, así como fondos de capital de riesgo. Uno de los pilares de esta política ha de ser, en primer lugar, revisar las normas técnicas y velar por que no se conviertan en un freno a la producción nacional; adicionalmente, se debe desarrollar una campaña para la simplificación de los trámites administrativos relacionados con la ejecución de proyectos de ciencia y tecnología, así como establecer acuerdos con la Contraloría y la Procuraduría para lograr que la legislación responda al contexto actual y que se la pueda aplicar sin barreras burocráticas.

Igualmente, sería clave simplificar los trámites aduaneros relacionados con la importación y la exportación de equipos e insumos para el sector de CTel.

Por otra parte, para apoyar la demanda de este sector, se debe mejorar los incentivos tributarios para la modernización tecnológica de las empresas y favorecer la formación de técnicos e ingenieros en electrónica, con énfasis en la formación práctica y el desarrollo del espíritu emprendedor.

Ciencias básicas

La investigación básica ha sido el motor de la mayor parte de los desarrollos tecnológicos actuales. La mecánica cuántica, por ejemplo, permitió la comprensión de los materiales semiconductores, lo cual hizo posible el invento del transistor, el chip y, finalmente, el auge de las TIC y otras tecnologías modernas.

El espacio natural para desarrollar la investigación básica son las universidades y los centros de investigación. Buena parte de la investigación básica en el ámbito mundial es realizada por estudiantes de doctorado y, en un menor grado, por los de maestría. Por ese motivo es indispensable fortalecer los programas de doctorado nacionales, dotándolos de recursos suficientes, de una administración ágil y de la posibilidad de que los estudiantes tomen pasantías en el exterior.

También es fundamental la participación de científicos colombianos en grandes proyectos, como el CERN o los observatorios gigantes de Chile, porque es en esos grandes laboratorios en donde se realizan los mayores avances tecnológicos. La internet nació en el CERN, al igual que muchos de los avances en tecnología de vacío o en imanes superconductores, los cuales posteriormente han sido utilizados en la industria o en la medicina.

Está claro que una política de formación de doctores requiere también estrategias para lograr su vinculación a entidades nacionales en buenas condiciones laborales. Un espacio natural para ello son las universidades, pero estas tienen restricciones para vincular nuevos docentes. La industria, por su parte, tiene un bajo nivel tecnológico, y, por lo tanto, importa toda la tecnología; esto hace que no vea necesario vincular doctores. Las propuestas puntuales que implican incentivos tributarios o financiación parcial del salario de estos profesionales no representan tampoco una solución a largo plazo. Es necesario, por lo tanto, promover la creación de otro tipo de espacios, como emprendimientos de base tecnológica, centros de investigación autónomos o unidades de investigación en la industria.

Ahora bien, la posición avalada en ciertos círculos gubernamentales es que Colombia debe dedicarse a la investigación aplicada y dejar que los países industrializados desarrollen la básica. Esto es, a todas luces, una idea errónea, y ha afectado el desarrollo científico nacional, principalmente porque el conocimiento de nuestra biodiversidad, el tratamiento de las enfermedades parasitarias, la mitigación del impacto del cambio climático y el conocimiento de la geología nacional requieren investigación básica que no está disponible en el ámbito internacional, a causa de nuestras condiciones particulares.

Incluso, si fuera el caso, es fundamental que en el país haya grupos que hagan investigación de frontera. Como lo afirmaba Abdus Salam, «para poder comprar tecnología sin cometer errores, hay que tener en el país que compra gente del mismo nivel de la que desarrolló la tecnología en el país que vende». La única forma de lograr esto es que en el país trabajen personas que estén al día en la tecnología que se compra.

En conclusión, en el caso concreto de Colombia, se requiere apoyar el desarrollo de la investigación básica no solo para aportar al desarrollo de la ciencia mundial, sino también para resolver los problemas nacionales concretos.

¿Quién debe costear este tipo de investigación? Por lo general, la investigación básica es exclusivamente financiada por el Gobierno, mientras que la investigación aplicada puede incluir financiación del sector privado. Y ¿qué se debe investigar en Colombia? La investigación básica en materiales es muy importante para el sector de la energía. La nanotecnología, por ejemplo, se emplea en la fabricación de baterías de muy alta eficiencia o en la producción de celdas solares, lo cual tiene obvias repercusiones en la economía. Del mismo modo, la investigación en telecomunicaciones, automatización e instrumentación permite tener una mayor capacidad de negociación a la hora de comprar tecnología en esos sectores.

Es claro entonces que el encargado de fortalecer la línea de financiación destinada a las ciencias básicas es el Minciencias, con ayuda de los recursos de regalías destinados a ciencia y tecnología.

Además, se deben consolidar los programas nacionales de doctorado en ciencias básicas y sociales. En particular, las becas para posgrados que otorgan entidades nacionales deben orientarse prioritariamente a la realización de trabajos en el país y a la financiación de pasantías cortas en el exterior.

Una vez se tenga la masa crítica necesaria, el siguiente paso es promover la vinculación de doctores como docentes a las universidades públicas y privadas, donde el título de doctor sea, en efecto, un requisito para ello.

Finalmente, para incrementar el impacto de las investigaciones en ciencias básicas que respondan a los retos del país, se debe fortalecer los centros de investigación autónomos que se enfoquen proyectos de investigación básica.

Cabe resaltar que estas políticas, aunque deben ser prioritarias, no deben dejar de lado la estimulación de la cooperación internacional en proyectos de investigación de alto nivel.

Otro frente importante en el que se debe actuar es el de la promoción del interés por la ciencia en los jóvenes, por medio de programas de educación formal y no formal. La educación básica debe procurar estimular la curiosidad natural de los niños, desarrollar la creatividad y el deseo de entender el mundo que los rodea. La educación media debe estar orientada a la comprensión de conceptos básicos en ciencias naturales, matemáticas y ciencias sociales, así como hacia el desarrollo del espíritu crítico. La educación superior, además de desarrollar competencias específicas, debe tener un eje práctico, orientado a la solución de problemas reales.

Finalmente, es necesario promover la creación y el fortalecimiento de espacios que acerquen la ciencia a las personas, tales como los museos de historia natural, los centros de ciencia y los planetarios, puesto que son herramientas valiosísimas para complementar la educación formal, así como el interés y la legitimación del público por la ciencia.

Centros de investigación autónomos

Un centro de investigación autónomo es una entidad de derecho privado, sin ánimo de lucro, que ha nacido de iniciativas personales o, en algunos casos, institucionales, pero que no ha sido resultado de políticas gubernamentales explícitas. Esta categoría agrupa a los institutos gubernamentales, a los adscritos a universidades públicas o privadas y a aquellos que pertenecen a las empresas industriales del Estado.

Si bien varias de esas entidades nacieron en los años 70, la Ley 29 de 1990 y el Decreto-Ley 393 de 1991 facilitaron la creación de un número importante de ellas. Sin embargo, en ese entonces, en Planeación Nacional (y en parte en Colciencias) se adoptó la idea errónea de que debían ser financieramente autosuficientes, para lo cual vendían proyectos a la industria y al Gobierno. Esa visión simplista nació de una percepción

equivocada de la realidad nacional, a causa de la falta de experiencia práctica de los que la propusieron.

Por lo anterior, esas entidades no han sido nunca reconocidas por el Gobierno como actores importantes del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCTI), y, salvo en casos esporádicos, su única fuente de financiamiento han sido los proyectos de investigación, con las dificultades prácticas que eso conlleva.

Así pues, para identificar el papel de este tipo de entidades en el SNCTI, y, en consecuencia, para explotar efectivamente esta modalidad, a continuación, se presentan algunas de sus ventajas sobre otros actores del sistema, como los institutos públicos o las universidades, pero también se exponen sus debilidades.

Ventajas

- Agilidad administrativa relacionada con su carácter privado, pero también con una estructura interna muy liviana.
- Agilidad en la toma de decisiones, la cual a menudo no requiere más de dos pasos.
- Personal especializado con contrato de tiempo completo, que puede ejecutar los proyectos de manera rápida y eficiente y sin restricciones de tiempo.
- Buenas relaciones nacionales e internacionales con entidades similares de gran utilidad para apoyar la ejecución de los proyectos.
- Experiencia en trabajo de campo y conocimiento del país.

- Grupos interdisciplinarios que pueden resolver con éxito problemas complejos.
- Experiencia en gestión de proyectos y en trabajos con el sector productivo

Debilidades

- Limitado músculo financiero.
- En la mayoría de los casos, nacieron sin capital de trabajo y son muy sensibles a las demoras en la aprobación de los proyectos y en los desembolsos correspondientes, lo cual los obliga a recurrir al sector financiero con costos muy elevados.
- Las dificultades financieras hacen muy difícil retener al personal de alta calificación ofreciendo salarios atractivos.
- A menudo no se puede mantener una línea de investigación promisorio por falta de una financiación a largo plazo.
- La necesidad de generar recursos a veces obliga a ejecutar proyectos en temas no necesariamente asociados con la misión de la entidad.
- En algunas oportunidades, Minciencias ha abierto convocatorias para ofrecer apoyo institucional a estos centros (con restricciones complejas para el uso de los recursos); estos apoyos les han permitido mantenerse. No obstante, recientemente se eliminó esa línea de financiación, para dar prioridad a otros temas.

- Por lo anterior, muchos de los centros enfrentan en este momento una grave crisis que puede llevar a la liquidación de varios de ellos a corto plazo.

Con lo anterior, se hace evidente la necesidad de definir una política de centros de investigación, que incluya los diferentes actores involucrados, tales como centros de investigación, centros de desarrollo tecnológico y centros de ciencias. Además, se debe establecer mecanismos adecuados de financiación de mediano y largo plazo para ese tipo de entidades, con recursos que permitan cubrir gastos operacionales con flexibilidad. Si se cuenta con una financiación básica para ello, los centros pueden cubrir el resto de sus necesidades por medio de proyectos. Un modelo adecuado puede ser el de los institutos Fraunhofer en Alemania; estos institutos reciben el 30 % de su presupuesto de funcionamiento de fuentes gubernamentales, cuya constitución puede ser mixta, una parte regional y otra nacional. Finalmente, para solucionar el limbo legal en el que se encuentran estos centros, se debe permitir que los centros se rijan por el derecho privado, con el fin de garantizar una adecuada agilidad en su funcionamiento.

Hacia una política pública de CTel

La Misión de Sabios enfrenta el reto diseñar y efectuar una política de CTel, que oriente el proceso de diversificación productiva y la creación de nuevos sectores, y que, a su vez, fomente la modernización y la competitividad en los sectores más tradicionales. Por tanto, con la creación del Minciencias, la apuesta más importante es la gestión de una política pública que contenga los siguientes lineamientos:

- Incrementar la inversión en I+D a tal punto que esta sea igual o superior al 1 % del PIB y que la inversión en Actividades de Ciencia Tecnología e Innovación (ACTI) sea mayor o igual al 2 %; así mismo, se espera que ambas tengan un crecimiento exponencial de 1,5 % y 2,5 %, respectivamente, para el año 2030 (Posada, 2019); además, mantener la proporción del 10 % del Sistema Nacional de Regalías que se destina para ciencia y tecnología.
- Simplificar los procesos para obtener beneficios tributarios por inversiones en CTel; por ejemplo, modificar la Ley Nacional de Desarrollo, para que los beneficios tributarios puedan ser concedidos a proyectos de innovación y proyectos de ciencia y tecnología.
- Reformar la destinación de recursos para CTel del Sistema General de Regalías y mejorar su operatividad, garantizando que un porcentaje de estos recursos sea asignado al financiamiento equilibrado de proyectos en ciencias básicas y en obras civiles.
- Crear una Comisión Nacional de Competitividad y Ciencia, Tecnología e Innovación como órgano rector del Sistema Nacional de CTel, que estaría encargada de liderar la orientación de este sistema, encabezada por el presidente de la República y coordinada por una Alta Consejería Presidencial dedicada exclusivamente a estos temas; así mismo, contaría con una secretaría técnica apoyada por todos los ministerios.
- Promover en las regiones la consolidación o la creación de oficinas de transferencia tecnológica, a fin de crear redes de asociados industriales, establecer normas para la comercialización de los resultados de las investigaciones

y administrar los derechos de propiedad intelectual de los semilleros, los parques científicos y las universidades.

- Apoyar los procesos de maduración de los emprendimientos de alto valor agregado y productos de investigación (*spin off*) y establecer un entorno propicio para el emprendimiento dinámico (parques tecnológicos); además, desarrollar campañas para promover la creación y la certificación por parte del Minciencias de grupos de investigación dentro de las empresas.
- Crear un programa integral de innovación abierta que fortalezca la estrategia de CTelI, mediante una plataforma virtual que consolide las necesidades en innovación de empresas de orden público y privado, con la oferta de soluciones de investigadores, universidades, particulares y entidades en el país.
- Promover una mayor participación de las ciencias puras y las ingenierías en la educación superior, mediante un incremento de becas e incentivos para estudios de maestría y doctorado, orientados principalmente a la realización de trabajos en el país; además, es importante estimular la cooperación internacional en proyectos de investigación de alto nivel.
- Implementar una estrategia educativa para que los niños y la juventud despierten el gusto, la curiosidad y el pensamiento crítico por la ciencia, de tal manera que el uso de la investigación en el aula sea una habilidad pedagógica acertada para estimular la producción de conocimiento.
- Promover la creación de parques temáticos (como, por ejemplo, Maloka o el Parque Explora), museos de historia

natural, centros de ciencias, planetarios, etc., como herramientas valiosas de divulgación y complemento de la educación formal y para favorecer el interés del público por la ciencia (Posada, 2019).

En general, la ciencia y la tecnología dependen de la innovación; la innovación depende, a su vez, de un adecuado funcionamiento de los mercados y de unas capacidades gerenciales que permitan introducir y posicionar con éxito bienes y servicios nuevos (Gómez *et al.*, 2014).

Así las cosas, y considerando los planteamientos presentados anteriormente, es importante que el país les apueste a la ciencia, la tecnología y la innovación, sectores en donde a largo plazo hay mucho que ganar y poco que perder.

En conclusión, para ejecutar con éxito la política pública de CTel, y aprovechando la reciente creación del Minciencias, así como el compromiso de la Presidencia de tener en cuenta las propuestas de la nueva Misión de Sabios, es necesario exigir al Gobierno y a las autoridades locales un mayor compromiso con la ciencia, la tecnología y la innovación. Esto implica reorientar los roles de las entidades públicas que hacen parte del SNCTI, incrementar los recursos públicos y establecer una ley de beneficios tributarios para aquellos que inviertan y conviertan la empresa en un centro de estrategia de CTel. También es necesario financiar, apoyar y conectar a grupos de investigadores, para que promuevan trabajos sectoriales y transversales de talla mundial, y, por último, despertar el gusto por la ciencia y generar en la población infantil y juvenil la motivación y las competencias científicas que les permitan ser en el futuro científicos y profesionales innovadores que valoren la ciencia, la tecnología y la innovación como elementos centrales que determinan la cultura científica del país.

Situación actual

Lo presentado anteriormente solo puede hacerse posible mediante una correcta estructuración y coordinación entre cada uno de los entes del Sistema de CTel. Lamentablemente, el sistema está enfrentando una grave crisis estructural, que requiere medidas de corto plazo.

Entre los temas principales que se deben abordar está la falta de una política nacional de ciencia y tecnología que incluya a todos los actores del sistema, entre los cuales se encuentran los diversos sistemas que han surgido en otros sectores, como el ambiental, el agropecuario, el de salud y defensa. Igualmente, hay que tener en cuenta la falta de apoyo financiero del Gobierno central al Minciencias.

Otra dificultad adicional es la poca prioridad que se le da a la ciencia, la tecnología y la innovación, lo cual hace que la inversión se mantenga a muy bajo nivel. De hecho, aunque en materia de inversión los recursos en ciencia y tecnología se han incrementado lentamente (pasaron de 0,12 % del PIB en 2000 a 0,24 % en 2018; y en ACTI, de 0,38 % a 0,61 %, en el mismo periodo), esas cifras siguen siendo muy bajas si se las compara con las de otros países, como los de la OCDE (2 % del PIB en I+D). Corea invierte 4,5 % e Israel 4,3 %, cifras a las cuales se les puede atribuir buena parte del desarrollo económico y tecnológico de estos países.

Ahora bien, según el Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OCyT), en Colombia, en 2018, 67 % de la inversión total en ACTI la puso el sector privado (Pardo y Cotte, 2018). Esa cifra debe ser analizada con cuidado, ya que la mayor parte de esta inversión se destinó a formación, servicios, compra de computadores y *softwares* y renovación de equipos; muy poco se designó a investigación y desarrollo.

Por su parte, el Sistema de Regalías para CTel, aunque se trata de una muy buena idea para promover el desarrollo regional, tiene graves problemas de diseño. Los sistemas de presentación, ejecución y control de los proyectos están diseñados para el manejo de obras civiles (por ejemplo, el MGA y el Gesproy), y no son adecuados para proyectos de I+D. Es por esto que,

pese a que el efecto de las regalías es positivo (gracias a estas se alcanzó un máximo de 0,75 % en ACTI en 2013), la comunidad científica encuentra una barrera burocrática significativa al momento de presentar proyectos de regalías, lo cual explica la baja ejecución de los recursos.

Algo similar se está presentando con la puesta en marcha de programas como Colombia Científica, cuya ejecución es tan compleja como la de los proyectos de regalías, y ponen en evidencia la falta de coordinación entre entidades del SNCTI.

En general, uno de los grandes obstáculos que enfrenta la investigación en el país es la excesiva burocracia en las entidades públicas, pero también, a menudo, en las de carácter privado. Un ejemplo de esto es que no se aprovecha la legislación existente que permite la contratación directa para temas relacionados con CTel.

A esta falta de organización y excesiva burocracia, ha de agregarse la desarticulación entre la academia y el sector productivo. Esto trae ineficiencias al momento de la ejecución del presupuesto, ya que parte importante de este se destina a financiar becas de doctorado en el exterior, sin pensar que a los jóvenes doctores hay que darles trabajo y que, por lo tanto, hay que fortalecer a las entidades del sistema y mejorar la financiación para proyectos. A esto cabe agregar las serias restricciones con las que cuentan las universidades para vincular a profesores nuevos. Por lo tanto, la idea de que la industria puede absorber a los doctores es utópica, porque son muy pocas las empresas que tienen centros de investigación que puedan aprovecharlos eficazmente.

Esto último hace que la industria nacional actual sea de muy bajo nivel tecnológico y, salvo contadas excepciones, que sea muy poco innovadora, como lo muestran los datos del OCyT (2018).

Por lo tanto, la idea de que la mayor parte de la inversión debe venir del sector privado es una ilusión, debido a las características de nuestro sector productivo. Además, está ampliamente demostrado que aun en los países industrializados la inversión gubernamental ha sido decisiva para los grandes avances tecnológicos que luego han sido aprovechados por la industria.

A pesar de lo anterior, se ha producido un crecimiento apreciable del número de investigadores, de grupos de investigación y de artículos en revistas indexadas, según los datos del OCyT. No obstante, lo que no se cuenta es que esto último es una respuesta a los incentivos otorgados en diversas universidades privadas para quienes publiquen en revistas indexadas. El problema de esta situación es que las publicaciones de mayor impacto (y, por lo tanto, aquellas por las cuales se da un mayor beneficio) rara vez responden de manera adecuada a los retos que se tienen en el país, ya que los recursos y el personal que apoya estos trabajos provienen de entidades internacionales. Así, aunque el hecho de contar con niveles significativos en este índice demuestra que tenemos el talento humano necesario para desarrollar las innovaciones que requiere el país, este talento está siendo utilizado por el mejor postor, no por Colombia.

De lo anterior, no cabe duda de que la creación del Minciencias constituye una oportunidad muy importante para consolidar el sector de CTel en Colombia. Es por esto que se debe aprovechar esta oportunidad para evaluar la posibilidad de crear un Comité Interministerial para coordinar las actividades que desarrollan las entidades gubernamentales en ciencia y tecnología, así como analizar la creación de un Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que sea asesor del presidente de la República y que esté constituido por personas de reconocido prestigio.

Ahora, el Minciencias se enfrenta a grandes retos, por ejemplo:

- Simplificar al máximo los trámites para la presentación, la evaluación y el seguimiento de los proyectos.
- Revisar la legislación actual en CTel, con el fin de identificar vacíos, duplicaciones y contradicciones. La legislación para la contratación en este campo, los incentivos tributarios, la legislación aduanera, etc., son de especial importancia. Podría ser útil coordinar con la Contraloría los procesos referentes a la contratación.
- Realizar un análisis crítico del Sistema de CTel y de los mecanismos de medición y evaluación. Es urgente simplificar el CvLAC; evaluar la conveniencia de mantener la noción de grupo, que en muchos otros países no existe, y analizar los procesos de reconocimiento de las entidades por parte del Ministerio.
- Aclarar el papel de los Consejos Departamental en CTel (Codectis) y buscar mecanismos de financiación y estímulo en el ámbito regional.

Conclusiones

A modo de resumen, se presentan, a continuación, algunas sugerencias y recomendaciones para mejorar el SNCTI en Colombia.

Sugerencias

- Se requiere fortalecer el sector de CTel en general, mediante el incremento de los recursos disponibles para la financiación de proyectos de investigación

básica y aplicada, aprovechando la reciente creación del Minciencias y el compromiso del presidente Duque de tener en cuenta las propuestas de la nueva Misión. Lo anterior hace necesario inducir un proceso de modernización del sector productivo nacional actual y de creación de empresas de base tecnológica, en particular para el sector de la energía.

- Se debe considerar el establecimiento de programas orientados por Misión de Sabios sobre grandes temas estratégicos. El Gobierno debe jugar el papel de emprendedor y cofinanciador de ese tipo de proyectos. Sin embargo, es importante tener un amplio panorama de posibilidades y dejar un espacio amplio a la investigación básica.
- Se requiere apoyar la creación y la consolidación de incubadoras y aceleradoras de empresas de base tecnológica, así como de fondos de capital de riesgo, en el marco de una política de reconversión productiva, orientada por la cuarta revolución industrial.
- En ese mismo campo, se debe establecer una política de apoyo a los centros de investigación y los centros de desarrollo tecnológico como interfaz entre el sector académico y el sector productivo. Esas entidades tienen una mayor agilidad administrativa que las universidades y que los institutos públicos y pueden responder de manera ágil a los requerimientos del sector productivo.
- Se debe establecer los mecanismos para sustituir la exportación de materias primas por la exportación de productos con valor agregado. En general, Colombia tiene también excelentes oportunidades de exportar tecnología a países vecinos en campos como el café, el petróleo, la corrosión y el sector eléctrico. Igualmente,

es necesario establecer los mecanismos para hacerlo de manera ágil, ya que las normas técnicas en muchos casos dificultan la producción nacional de equipos en estos campos.

Recomendaciones

- Incrementar la inversión en I+D a por lo menos el 1 % del PIB, y la inversión en ACTI al 2 % en el presente periodo presidencial; así mismo, para 2030, aumentarlas al 1,5 % y 2,5 %, respectivamente (financiación del Gobierno; no se incluyen los recursos de universidades o empresas). Con ese fin, hay que mantener la proporción del 10 % de las regalías destinado a CTel, el cual está en peligro a causa de la reforma constitucional que se encuentra en trámite en el Congreso. Para justificar este incremento, se debería financiar un estudio del impacto de la investigación sobre el desarrollo, aunque financiar la investigación no es un gesto de altruismo, sino de interés económico.
- Establecer una política de apoyo a los institutos y los centros de investigación autónomos que garantice por lo menos el 30 % de su presupuesto con fondos gubernamentales (lo cual puede incluir financiación regional, como ocurre con los institutos Fraunhofer en Alemania). Esas entidades se deben someter a una evaluación exhaustiva cada cinco años. Así mismo, se debe proponer una ley para garantizar la supervivencia de este tipo de entidades.

- Consolidar una política de apoyo a la creación de empresas de base tecnológica, con énfasis en los sectores de la energía y de la electrónica, estableciendo incubadoras y aceleradoras de empresas, así como fondos de capital de riesgo.
- Desarrollar una campaña para la simplificación de los trámites administrativos relacionados con la ejecución de proyectos de ciencia y tecnología. Establecer acuerdos con la Contraloría y la Procuraduría para lograr que la legislación actual (contratación directa, exenciones tributarias etc.) se pueda aplicar sin trabas. Igualmente, simplificar los trámites aduaneros relacionados con la importación y exportación de equipos e insumos para CTeI.
- Para la presentación y el seguimiento de los proyectos de regalías y otros, se recomienda utilizar la metodología de Colciencias, y no la que usa el DNP para la construcción de obras civiles.
- Mejorar los incentivos tributarios para la modernización tecnológica de las empresas y para la creación de empresas de base tecnológica. Así mismo, hay que reactivar las líneas de cofinanciación que tuvo Colciencias y mejorar la formación de técnicos e ingenieros en electrónica, con énfasis en la formación práctica y el desarrollo del espíritu emprendedor.
- Cuando la financiación sea por proyectos, se debería poner más esfuerzo en la evaluación ex-post, y no tanto en la ex-ante. Es ridículo el tiempo que demora poner en marcha una investigación y los enormes costos de transacción. Esta financiación puede acompañarse con recursos del sector privado, en el caso de temas

de interés de la industria y temas generales; se puede destinar un porcentaje de las utilidades para inversión en innovación propia o general y formación propia o general. Por ejemplo, en Brasil, la inversión corresponde al 1 % del ingreso anual de las empresas reguladas (lo paga entonces el consumidor), del cual el 0,4 % lo gastan las empresas en proyectos propios, con el visto bueno del regulador, y el 0,6 % va a un fondo general, como Colciencias, para investigación y formación en el tema.

- La financiación debe fortalecer los pocos centros nacionales que tienen alguna masa crítica, y se debe procurar que no se la disperse en todo el país. Hay que crear estrategias para apoyar universidades emergentes de calidad, pero no repartir todos los recursos como se está haciendo en el Sistema de Regalías.
- Hay que mantener las acciones que son positivas para favorecer la investigación e innovación en las empresas, como los incentivos tributarios. Se debe priorizar las áreas importantes, pertinentes y con alto potencial para el país, y estas no deben ser más de cinco (entre ellas, energía, transporte y agua). Adicionalmente, se debe dar prioridad a la realización de proyectos piloto hasta la demostración.
- La financiación debe incluir siempre la formación doctoral, ya que los doctorados de calidad son fundamentales para disparar ciclos productivos. De lo contrario, los esfuerzos realizados hace unos años pueden verse afectados por la discontinuidad y la

dificultad de financiación de estudiantes. Es increíble que las universidades extranjeras buscan afanosamente estudiantes colombianos, mientras que nosotros no podemos ofrecer oportunidades a aquellos que quieren estudiar en el país.

- El pregrado funciona bien en Colombia, pero los beneficios que se obtienen son marginales, con inversiones altísimas de tiempo y esfuerzo (tecnología madura); sencillamente no deberían necesitarse incentivos especiales, solo becas para buenos estudiantes.
- Revisar las normas técnicas y velar por que no se conviertan en un freno a la producción nacional.

Referencias

- Gómez, R., Hernando, J. y Mitchell, D. (2014). Innovación y Emprendimiento en Colombia: balance, perspectivas y recomendaciones de política, 2014-2018. Fedesarrollo. <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/149>
- Pardo Martínez, C. I. y Cotte Poveda, A. (eds.) (2018). Indicadores de ciencia y tecnología. Colombia 2018. Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología. <https://www.ocyt.org.co/proyectos-y-productos/informe-anual-de-indicadores-de-ciencia-y-tecnologia-2018/>

Anexo

Marco legal. Colombia posee un importante marco legal para el tema de ciencia, tecnología, innovación y competitividad:

- Ley 29 de 1990 y Decretos-Ley derivados, en particular el 585, el 393 y el 591 de 1991. Colciencias se vuelve instituto adscrito al DNP. Nace el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Constitución Política de Colombia de 1991, en especial los artículos 70, 71 y las reformas del Sistema General de Regalías, artículo 361 (Acto Legislativo 05 de 2011 y Acto Legislativo 04 de 2016).
- Régimen de contratación, Ley 80 de 1993, artículo 24.c, que autoriza la contratación directa para ciencia y tecnología.
- Incentivos tributarios, Reformas de 1997 y 2016 (Ley 1819).
- Ley 1286 de 2009. Colciencias se convierte en Departamento Administrativo.
- Ley 1951 de 2019. Creación del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

Marco institucional. La entidad rectora del Sistema, Colciencias, ha evolucionado de la siguiente manera:

- 1968. Creación de Colciencias como Fondo del Ministerio de Educación.
- 1991. Transformación en un Instituto para el Fomento de la Ciencia y la Tecnología (Decreto-Ley 585).

Establecimiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

- 2009. Transformación en un Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología (Ley 1286 de 2009). El Consejo se convierte en el CACTI, asesor de Colciencias.
- 2019. Ley 1951. Creación del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).
- 2019. Misión Internacional de Sabios.

Documentos CONPES de CTeI. En los últimos años se han producido varios documentos CONPES, específicamente de ciencia y tecnología y algunos otros relacionados con el tema, como el de política de doctorados, de propiedad intelectual y de biotecnología.

- CONPES 2739. Política Nacional de Ciencia y Tecnología, 1994-1998.
- CONPES 3080. Política Nacional de Ciencia y Tecnología, 2000-2002.
- CONPES 3582. Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2009.
- CONPES 3527 de 2009. Política Nacional de Competitividad y Productividad.
- CONPES 3866. Política Nacional de Desarrollo Productivo, 2016.
- En 2015 se intentó elaborar un nuevo documento CONPES de CTeI que nunca fue aprobado.

Propuesta de un Centro de Investigación en Sistemas Distribuidos

Diferentes grupos de investigación de la Universidad de los Andes que trabajan en el campo de la energía y el control se han unido alrededor de la iniciativa de la Facultad de Ingeniería —por el momento aplazada, pero que sigue siendo válida— para la conformación de un Centro de Investigaciones en Energía. En particular, estos grupos han venido tratando de enfocar su trabajo hacia los sistemas distribuidos para una energía sostenible.

Con este se busca aportar al fortalecimiento de tres ejes: (1) la creación de política pública y regulación que apoyen la toma de decisiones del Gobierno y los agentes públicos y privados, (2) la innovación y el desarrollo de tecnologías y herramientas más sofisticadas que involucren los diferentes actores en los ámbitos nacional y local y (3) la solución de problemas regionales y locales en procesos de coconstrucción.

Es importante anotar que los grupos que responden a esta iniciativa han desarrollado trabajos con otras universidades y aspiran a fortalecer la red de investigación que han conformado hasta el momento. Igualmente, en el trabajo desarrollado se ha colaborado con empresas nacionales y laboratorios de investigación internacionales.

A continuación, se presentan, de manera muy esquemática, los objetivos del Centro, las líneas de investigación y las contribuciones que esperan hacerse.

Objetivos generales

- Desarrollar modelos y herramientas que contribuyan con análisis rigurosos a las políticas energéticas y regulaciones nacionales relacionadas.
- Desarrollar investigación teórica y aplicada que ayude a encontrar soluciones sostenibles que favorezcan la productividad y la eficiencia económica y energética del país. Se hará énfasis en tecnologías que puedan ser adaptadas y producidas en el ámbito nacional.
- Formular y ejecutar proyectos de desarrollo, innovación y apropiación de nuevas tecnologías, considerando los lineamientos de cobertura energética, especialmente aquellos relacionados con el aprovechamiento de la energía solar y la biomasa en esquemas de microrredes.
- Colaborar con la construcción de liderazgos regionales en el desarrollo de investigación multidisciplinaria que contribuya a mejores prácticas en desarrollo energético y aporte soluciones en regiones y segmentos de población que lo requieran.
- Formar un número creciente de jóvenes investigadores con habilidad para entender la dimensión técnica, económica, ambiental y social del uso de la energía en el país y las evoluciones previstas en el ámbito internacional. Se mantendrán relaciones y colaboraciones con diferentes centros de energía y universidades que trabajen en este tema, con el fin de seguir y aprender de sus experiencias.

Líneas de investigación propuestas

Desarrollo de modelos y herramientas que incorporen flexibilidad e incertidumbre como principales contribuyentes (pero no únicos) a los aportes de política y regulación energética

- Política, regulación y mercados de energía. Seguridad energética.
- Estructura y organización de la industria y mercado eléctrico, en relación con los nuevos desarrollos tecnológicos y de selección por parte de los consumidores.
- Mercados de energía eléctrica diarios e intradiarios.
- Nuevos esquemas de negocios y plataformas transaccionales. Integración de negocios.
- Inversión y operación de fuentes no convencionales de energía, acumulación y transporte eléctrico.
- Impactos ambientales de los procesos relacionados con el aprovechamiento y el uso de la energía. Incidencias del cambio climático y opciones de mitigación y adaptación desde lo energético.
- Impactos sociales y esquemas de agregación de valor en proyectos de infraestructura.

Innovación y desarrollo tecnológico para favorecer las microrredes (generación distribuida renovable, respuesta de la demanda y vehículos eléctricos) y los nuevos materiales

- Redes inteligentes, microrredes y generación distribuida, con énfasis en sistemas de medición, automatización de redes eléctricas, despacho y control de generación y seguridad, recursos distribuidos y electrónica de potencia y respuesta de la demanda. Lo anterior para aportar a la formación de ciudades más sostenibles con un suministro de energía descentralizado urbano y rural y una gestión de la demanda.
- Información y nuevas tecnologías y equipamiento para el aprovechamiento de las energías eólica, solar, de biomasa e hidroeléctrica a pequeña y mediana escala. Sistemas de acumulación a gran escala.
- Desarrollo de materiales y esquemas para aprovechamiento solar, considerando el gran potencial e interés que esto supone para Colombia y Latinoamérica.
- Aprovechamiento de la biomasa moderna (biocombustibles y residuos agrícolas y forestales); esta posibilidad es interesante para el país en una etapa de posconflicto.
- Esquemas de respuesta de la demanda. Uso y desarrollo de mejores equipamientos, como medidores inteligentes, vehículos eléctricos, sistemas de monitoreo. Sistemas de acumulación a menor escala.
- Integración con otras infraestructuras que respalden los nuevos desarrollos, como el transporte eléctrico, las telecomunicaciones y el manejo de la información.

Presencia y desarrollo regional que favorezcan los programas de energización rural en el marco de los Planes de Energización Rural Sostenible (PERS)

- Construir esquemas y programas para lograr soluciones energéticas adaptadas, de manera sostenible, a los requerimientos y las potencialidades de las comunidades locales y las regiones.
- Aportar a construir un liderazgo regional en el desarrollo de investigación multidisciplinaria para incrementar el bienestar de la población.
- Formar un número creciente de jóvenes investigadores con habilidad para entender la dimensión técnica, económica, ambiental y social del uso de la energía.

Contribuciones esperadas

- La modernización de la infraestructura de suministro, transformación, transporte y uso de la energía de acuerdo con las nuevas tendencias.
- Hacer viable la implementación de nuevas fuentes de energía que complementen y sustituyan los derivados del petróleo y, más adelante, del carbón, mediante esquemas de planeación y operación compatibles con los mercados y propuestas de política que posibiliten ese reemplazo.

- El desarrollo de nuevas alternativas para incrementar los niveles de aprovechamiento de energía en diferentes sectores y aportar al desarrollo de la industria nacional, especialmente en cuanto al campo solar y la biomasa.
- La expansión del servicio de energía, y, en general, de servicios públicos, a nuevas regiones y mayores segmentos de la población, para mejorar las oportunidades productivas de sus pobladores.
- La formación de investigadores de alto nivel para la formulación y la ejecución de proyectos viables y sostenibles en el área y con una alta producción académica.

Educación e investigación

Educación para una sociedad sostenible y en paz

Para solucionar los problemas mencionados en el capítulo anterior, es prioritario buscar la ejecución de un sistema educativo nacional adaptado y acorde a las necesidades de la ciencia y la financiación para desarrollar CTel.

Durante las pruebas del Programa Internacional para la Evaluación de Estudiantes (PISA, por sus siglas en inglés) del año 2015, Colombia se desempeñó por debajo del promedio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en ciencias, matemáticas y lectura. Su rendimiento promedio aumentó 28 puntos con respecto a los resultados de 2006; esta fue la segunda mejora más grande entre los 52 sistemas educativos con datos comparables (PISA, 2019). Sin embargo, cabe aclarar que en Colombia la variación del rendimiento académico se atribuye principalmente a las diferencias socioeconómicas de los estudiantes. El desarrollo del sistema educativo a la fecha no es el adecuado, debido a que el aumento en la inversión que realiza el Gobierno en materia de educación y CTel no ha sido significativo durante los últimos años. A esto se le debe sumar que se está subvalorando el capital humano del sector.

Como base para el desarrollo de la CTel, es necesario favorecer una efectiva apropiación social del conocimiento. El reto del Sistema Nacional de CTel es desarrollar estrategias puntuales que permitan generar conocimiento, a partir de la reivindicación de contextos sociales y culturales de producción (Colciencias, 2010). Considerando este reto, hay que decir que Colombia presenta atrasos significativos, especialmente si se la compara con otros países. Por ejemplo, se encuentra que la inversión del país en investigación y desarrollo fue en 2016 de tan solo 0,27 % del PIB. Esta cifra es baja al compararla con los porcentajes de inversión en Chile (0,36 %), México (0,5 %), Argentina (0,53 %) y Brasil (1,27 %) (Ricyt, 2019), e ínfima frente a países de ingresos altos, como Alemania (2,80 %), Japón (3,14 %), Corea de Sur (4,23 %) y Estados Unidos (2,92 %) (Eustat, 2019). Además, la inversión en ACTI ha tenido una caída directamente proporcional a la inversión en I+D en los últimos años; por ejemplo, para ACTI, en 2013, la inversión fue de 0,75 % del PIB y, en 2018, fue de 0,61 % del PIB (Pardo y Cotte, 2018).

Además, la educación en Colombia requiere cambios profundos, de tal manera que se integre la formación en energía y sostenibilidad desde pre jardín hasta la universidad, en función de la sociedad, la humanidad y el ecosistema, para establecer como eje central la urgencia de garantizar la disponibilidad de recursos del planeta Tierra para las actuales y futuras generaciones.

Dos de los elementos fundamentales que determinan la supervivencia de los seres vivos son el agua y la energía, por lo que es necesario garantizar su sostenibilidad. Dado que la energía y el agua son dos elementos dependientes entre sí, es esencial que los procesos de aprendizaje se fundamenten en procesos de sostenibilidad, donde se establezcan las transformaciones que sufre la energía primaria proveniente del Sol para proporcionar desde los alimentos que requerimos para la supervivencia hasta suplir las necesidades creadas en la evolución de la humanidad. Lo anterior, a fin

de lograr que los procesos de transformación de la energía sean eficientes y generen la menor cantidad de residuos y uso de agua posible.

Para ello es necesario considerar, de forma integrada, la energía y su transformación con el cambio climático y la sociedad, de tal manera que los procesos educativos estén soportados en los criterios científicos que fundamentan la sostenibilidad del planeta Tierra y los criterios sociales que señalan el efecto de la energía sobre la sociedad.

Es fundamental que en Colombia se integre la sostenibilidad con la política pública del Estado; para esto se requiere que, en todos los procesos de formación, se eduque en política, a fin de que los ciudadanos sean conscientes de su responsabilidad para garantizar la sostenibilidad de su territorio.

Para lograr una formación integrada que incluya los temas de sostenibilidad, es necesario explicitar que estos deben estar inscritos en los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE). Estos poseen unas fortalezas curriculares y pedagógicas, ya que están formulados para el desarrollo de estrategias de investigación y protección del espacio próximo a las instituciones educativas. La naturaleza transversal de los PRAE permite articular las diversas áreas de la educación básica y media, como el área de ciencias naturales y educación ambiental, el área de ciencias sociales y las competencias ciudadanas, para solucionar problemas ambientales auténticos, y, de esta manera, generar un aprendizaje significativo y crítico. También es importante que se consideren los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) como eje integrador de la formación, como horizonte de sentido del proyecto transversal.

Esta inclusión de los ODS en los procesos educativos de formación básica y media permitirá que se mantengan también en la formación superior. Para lograrlo será necesario presentar propuestas educativas que articulen los niveles de educación de primera infancia, básica, media y superior.

Una propuesta educativa de esta dimensión requiere el trabajo conjunto de diferentes ministerios del Gobierno nacional, como mínimo los de Educación, Ambiente y Desarrollo Sostenible, Minas y Energía, Agricultura y Desarrollo Rural, Vivienda, Ciudad y Territorio. Con esto se pretende lograr una mirada holística de una política pública sólida que establezca las estrategias para la inclusión del desarrollo sostenible en la educación formal y la formación de una cultura ética en el país que garantice el adecuado manejo de nuestros recursos, con el objetivo de cubrir las necesidades de los colombianos, sin seguir afectando la sostenibilidad de nuestro planeta.

Actualmente, en Colombia, de conformidad con lo establecido en las Leyes 115 de 1994 y 30 de 1992, la educación se define como un proceso de formación permanente, personal, cultural y social, que se fundamenta en una concepción integral de la persona humana, su dignidad, sus derechos y sus deberes (Congreso de la República de Colombia, Ley 115, art. 1).

Es decir que legalmente la idea de articular una educación que garantice la sostenibilidad es posible en el presente marco legal. Entonces, ¿qué hace falta para lograr los niveles de alfabetización en sostenibilidad que debe caracterizar a todo ciudadano del siglo XXI?

Durante los últimos 20 años, el sistema educativo colombiano ha experimentado una transformación fundamental. Una de las prioridades ha sido el acceso a la educación, con ambiciosas políticas cuyo propósito es incrementar el número de estudiantes matriculados en todos los niveles y llevar los servicios educativos a todas las zonas rurales y urbanas del país.

Sin embargo, la expectativa de vida escolar de los estudiantes con las peores condiciones de pobreza es de solo 6 años, en comparación con la cifra de 12 años de los más ricos, y solo el 9 % se matricula en educación superior, en comparación con el 53 % de los pertenecientes a las familias más

acaudaladas. La baja calidad de la educación es un factor determinante de este retiro progresivo. La falta de un apoyo adecuado desde el inicio del aprendizaje deja a demasiados niños sin unas bases sólidas; por lo tanto, deben esforzarse al máximo para progresar a un ritmo aceptable, y tienen que repetir años o desertar del todo (OCDE, 2016).

En 2015 el sector más beneficiado por el presupuesto fue la educación, con cerca de 29,4 billones de pesos de los recursos presupuestales de la nación; no obstante, el gasto público de nivel terciario en educación para el año 2015 fue de tan solo 4,5 % del PIB. Esta cifra resulta baja al compararla con los porcentajes asignados en Chile (4,9 %), México (5,2 %), Argentina (5,8 %) y Brasil (6,2 %), e ínfima frente a países que tienen una educación de alta calidad, como Alemania (4,8 %), Finlandia (7,1 %), Reino Unido (5,6 %) y Nueva Zelanda (6,3 %) (Banco Mundial BIRF-AIF, 2019). Además, en educación preescolar, básica y media, entre 2010 y 2017, el gasto privado creció 28,39 %, y el público, solo 19,64 %, con un incremento en promedio de 3,67 % en el gasto privado y 2,7 % en el público. En general, se observa que las desigualdades comienzan a temprana edad; y muchos niños desfavorecidos nunca van a la escuela, no empiezan a tiempo, o asisten a instituciones de menor calidad.

Con lo anterior, se puede pensar que en la educación básica y media es donde se encuentra el problema; no obstante, la educación superior también tiene serias dificultades: tal como lo describe Isaza (2019), la cantidad de estudiantes que ingresan a la universidad está creciendo muy poco o va en disminución. Esto no se debe a que hay menos jóvenes de la edad entre 17 y 21 años, ya que la cobertura es menos de la mitad en el caso de las universidades, sino que la problemática es mucho más compleja; puede ser consecuencia de la cada vez menor transición hacia la universidad de los jóvenes de familias de bajos recursos (menos del 10%), el incremento por encima del IPC de las matrículas en las instituciones

privadas e incluso por la oferta de microcursos que se ha tomado el siglo XXI (Isaza, 2019). La realidad es que cada uno de estos factores dan una señal de los cambios que deben hacerse: más presupuesto para las universidades públicas, no tratar a la calidad en la educación como un servicio de lujo, y modernizar las prácticas para estar a la par con la actual revolución tecnológica --lo que a su vez, implica un cambio sobre como se piensa la labor docente.

Si lo anterior no fuera suficiente, se tienen también problemas en el objetivo de la educación superior. El discurso de “adecuar los programas de estudios a lo que el país necesita” no es nuevo. Por ejemplo, en las leyes educativas de 1900, se define como prioridad que la educación para los campesinos y los pobres debe estar centrada en el cultivo de las parcelas y en los oficios básicos. Entre tanto, las clases dirigentes orientaban sus estudios al bachillerato clásico, que les permitía acceder a la burocracia.

Sin embargo, pretender formar profesionales con una limitada visión del mundo y enfocada sobre todo en su desempeño laboral no solo está creando barreras en su rol como ciudadanos, sino que lejos de impulsar la economía la puede estar debilitando. Esto es precisamente lo que ha venido ocurriendo con la educación en Colombia desde hace un buen tiempo. Hacia 1970 la educación básica humanista se empezó a modificar por una más pragmática, menos diletante, más ajustada a la realidad de la economía, a lo que requería la industria. El lenguaje ayudó; para menospreciar a alguien, se aludía a esa persona como “es un teórico”. Se inició la supresión de las cátedras de historia y de filosofía. La geometría dejó de enseñarse como un sistema lógico deductivo y dio paso al simple cálculo de áreas y volúmenes sencillos; ¿para qué un mínimo de rigor si lo que se quiere es el cálculo de ladrillos y baldosas? Se privó de un método lógico deductivo a quien no va a ser un matemático de la enseñanza. Aún hoy incluso las personas educadas confunden las condiciones necesarias con las condiciones suficientes.

Las facultades de ingeniería ajustaron sus currículos disminuyendo la matemática y la física “no aplicadas”. Si el resultado hubiera sido un aumento de la productividad, al menos podrían justificarse parcialmente los cambios. No obstante, se pasa por alto que las asignaturas “inútiles” (por ejemplo, literatura, historia, ciencia política, teoría matemática y filosofía) son claves para formar el razonamiento complejo que permite enfrentar los grandes retos de la sociedad y de la vida.

Los resultados de estas políticas medidas en su efecto sobre la productividad han sido desastrosos. La productividad anual, en el periodo de 1967-1974, creció al 2,09 %; luego empezó a mostrar descensos y, en algunos periodos, como en 1980-1985, fue negativa (-0,16 %). En el periodo 1970-1994 fue del 0,83 %. Entre 1998 y 2018, la productividad creció menos del 1 % anual. Es decir, podemos afirmar que somos más escolarizados y menos productivos, y que se sacrificó la enseñanza humanística sin obtener los resultados buscados.

A partir del plebiscito de 1957, que ordenó destinar al menos un 10 % del presupuesto a la educación, lo cual conllevó a una mejora en los años de escolaridad: de 3,1 años en 1957 se pasó a 4,2 en 1970; hoy en día esta cifra se sitúa en 7,4 años. Por su parte, el número de estudiantes en educación superior llegó en 2015 a 2'293.000, y se duplicó en el periodo 2003-2015. El número de graduados en el periodo 2001-2012 alcanzó 4'291.000, incluyendo profesionales, técnicos y tecnólogos. En 1960 el número de estudiantes universitarios no superaba los 60.000; por lo tanto, podemos considerarnos un país más escolarizado. Adicionalmente, el PIB de Colombia en 2018 fue 30 veces mayor que el de 1960. Si se toma como indicador de modernidad el número de ingenieros graduados, en 1960 este era de 2414, mientras que en 2018 superó los 550.000, es decir, 227 veces más que en 1960. En consecuencia, difícilmente puede concluirse que el ajuste logró los resultados esperados no solo a causa de lo anterior, sino también porque, al comparar la productividad total, mano de obra e inversión, esta última ha mostrado crecimientos superiores a la productividad del trabajo. La conclusión es entonces clara: de nada

nos sirve “entrenar” profesionales —ese término es más adecuado para la domesticación de los animales—; se deben formar ciudadanos.

Así las cosas, la barrera principal que se encuentra en la educación en Colombia no está solo en la estructuración de un plan coherente y continuo de educación en sostenibilidad, sino que el país se encuentra ante un problema de equidad, con diferencias en la calidad de la educación que reciben los estudiantes. Algunos de los problemas que exacerban esta situación son los siguientes:

- El olvido por parte del Ministerio de Educación Nacional de la prevención pedagógica, la exigencia y la pedagogía como herramientas reflexivas y prácticas para actuar.
- La falta de gusto de los jóvenes por el aprendizaje. En general, la educación se ha convertido en una obligación.
- Las familias desestimulan la escuela y entregan su responsabilidad a los educadores. Si al niño le va mal, la culpa recae en los profesores, y no en la familia, la cual es claramente el primer núcleo educativo.
- La pérdida del lugar de relevancia del maestro como referente cultural, porque un tecnicismo se apoderó de sus funciones y hace que el conocimiento y el aprendizaje sean fácilmente confundidos con la información. Esto es un punto neurálgico en esta época en la que en internet se puede acceder a una cantidad de información sin precedentes en la historia de la humanidad.
- La prevalencia de las inequidades regional, social, poblacional, étnica y cultural.
- En ocasiones, los recursos son insuficientes para obtener educación de alta calidad.

- El capital humano es subvalorado en el sector educativo.
- El sistema educativo no está adaptado a las necesidades de la ciencia.

En efecto, no es fácil diseñar y ejecutar una política pública estructural que oriente el proceso de alta calidad de la educación en los niveles preescolar, básica, media y superior, y que además reduzca las inequidades y promueva la movilidad social. Esto siempre buscando que los niños y jóvenes adquieran las herramientas necesarias que les permitan ser productivos sin sacrificar la sostenibilidad en un mundo cada vez más globalizado. Por tanto, la apuesta más importante es la gestión de una política pública que contenga los siguientes lineamientos:

- Atraer a individuos con altas calidades académicas y ofrecerles una formación de excelencia basada en la investigación y en la práctica. Para alcanzar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, debe reformularse la política de formación permanente de docentes, la cual debe asegurar en los educadores la consolidación de las competencias que serán trabajadas con los estudiantes.
- Fortalecer el sistema de evaluación de desempeño de los docentes, así como garantizarles una remuneración competitiva y un esquema de incentivos monetarios y no monetarios que premien su labor para el mejoramiento de la educación preescolar, básica y media.
- Articular los niveles de educación en zonas rurales y urbanas con el sistema de ciencia y tecnología, así como con los sectores productivos y sociales, de manera que los ciudadanos puedan aportar al desarrollo del país.

- Aplicar nuevos modelos pedagógicos y reformas curriculares profundas para que la educación contribuya a generar equidad y movilidad social (PISA, 2019). En particular, también es indispensable conectar los diferentes niveles y modalidades de educación (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2018, p. 21).
- Implementar una estrategia educativa para que los niños y la juventud despierten el gusto y la curiosidad por el aprendizaje y desarrollen el pensamiento crítico, de tal manera que el uso de la investigación en el aula sea una habilidad pedagógica acertada para estimular la producción de conocimiento. Sobre este punto, no se debe limitar la aplicación del pensamiento crítico a las ciencias duras, sino que también debe dársele el valor que merece en las ciencias humanas. Estamos educando personas; por lo tanto, no basta con tener buenos profesionales, necesitamos también buenos ciudadanos.
- Promover la creación de parques temáticos, como Maloka o el Parque Explora; museos de historia natural; centros de ciencia y planetarios, como herramientas de divulgación y complemento de la educación formal y para satisfacer el interés del público por la ciencia (véanse las conclusiones de la página 28).
- Realizar una revisión completa del sistema de financiación de la educación pública; esta revisión debe ser efectuada por expertos en el área que propongan modelos de financiamiento que garanticen la ampliación de este derecho y su sostenibilidad financiera en el mediano y largo plazo, de tal manera que se logre

elevar la pertinencia de la educación básica y reducir la alta deserción que todavía presenta el país durante la educación básica y media.

- Así mismo, y para garantizar el derecho a la educación superior de los jóvenes, se necesita un mayor compromiso financiero del Gobierno y la búsqueda de alternativas de financiación que se analicen de manera conjunta con las directivas de las universidades públicas. Este acuerdo es indispensable tanto para la sostenibilidad financiera de las universidades públicas como para seguir ampliando el derecho a la educación (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2018, p. 22).
- Innovar en la academia, de manera responsable, incorporando las TIC como elementos integrales del contexto educativo. Este proceso hará posible que el modelo de enseñanza colombiano asuma un nuevo enfoque educativo, flexible y eficiente, basado en el aprendizaje, y que brinde atención a la disciplina intelectual.

En conclusión, es importante que el país le apueste a un modelo educativo que no le tema a transformar e innovar en la forma de enseñar. Además, para el mejoramiento continuo del sistema, los estudiantes deben estar preparados y motivados para adquirir los conocimientos y las competencias

que van a recibir. Por su parte, los docentes deben adquirir las capacidades pedagógicas para transmitir y enseñar el conocimiento, así como utilizar los insumos focalizados en el aprendizaje, desde la infraestructura educativa hasta los materiales didácticos que ofrece el sistema. Finalmente, se debe contar con un liderazgo capacitado que le brinde seguridad, gobernanza y confianza a la reforma para que sea sostenible en el tiempo.

Para ejecutar de manera exitosa la política pública de educación, es pertinente (1) enfocarse en dar cumplimiento a los desafíos planteados en el Plan Nacional Decenal de Educación 2016-2026; (2) comprometer un poco más al Gobierno nacional y las autoridades locales con el sistema educativo, de modo que se reorienten los roles de las entidades públicas que hacen parte del sistema; y (3) incrementar los recursos públicos y formular una política descentralizada en ciencia y educación, que permita crear una institucionalidad sólida para gestionar de manera eficiente y transparente las soluciones a los problemas regionales y sectoriales, para alcanzar altos índices de desarrollo económico y social.

Finalmente, vale la pena resaltar que, aun considerando que es necesario efectuar una ejecución integral de la política, para solucionar los problemas mencionados, es prioritario buscar la consolidación de un sistema educativo nacional de alta calidad y con equidad. De esta manera, Colombia podrá alcanzar altos niveles de crecimiento económico y sostenible que afirmen la reducción de la pobreza y la desigualdad y que sienten las bases para una sociedad en paz y con sostenibilidad.

Referencias

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (2018). Desafíos para el 2030. Ciencia, tecnología, educación y medio ambiente. https://www.unicauca.edu.co/versionP/sites/default/files/files/Manifiesto_Ceincia_Desafios.pdf
- Banco Mundial BIRF-AIF. (2019). Gasto público en educación, total (% del PIB), Colombia, Argentina, Chile, Brazil, México, Germany, Finland. Consultado el 6 de agosto de 2019. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SE.XPD.TOTL.GD.ZS?end=2015&locations=CO-AR-CL-BR-MX-DE-FI&start=1979&type=shaded&view=chart>
- Congreso de la República de Colombia. (1994, 8 de febrero). Ley 115. Por la cual se expide la ley general de educación. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-85906_archivo_pdf.pdf
- Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias. (2010). Estrategia nacional de apropiación social de la ciencia, la tecnología y la innovación. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/estrategia-nacional-apropiacion-social.pdf
- Instituto Vasco de Estadística, Eustat (2019). Gasto en I+D (% PIB) por país. 2006 - 2017. Consultado el 24 de julio de 2019. http://www.eustat.eus/elementos/ele0003200/ti_Gasto_en_ID__PIB_por_pais_1997-2012/tbl0003292_c.html

- Isaza, J. F. (2019, 21 de agosto). Universidades privadas, ¿con cada vez menos estudiantes? El Espectador. <https://www.elespectador.com/opinion/inequidad-columna-877141/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE. (2016). Revisión de políticas nacionales de educación. La educación en Colombia. https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-356787_recurso_1.pdf
- Pardo Martínez, C. I. y Cotte Poveda, A. (eds.) (2018). Indicadores de ciencia y tecnología. Colombia 2018. Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología. <https://www.ocyt.org.co/proyectos-y-productos/informe-anual-de-indicadores-de-ciencia-y-tecnologia-2018/>
- Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos, PISA. (2019). Compare your country, PISA 2015. Consultado el 24 de julio de 2019. <http://www.compareyourcountry.org/pisa/country/COL?lg=en>
- Red de Indicadores de Ciencia y Tecnología Interamericana e Iberoamericana, Ricyt. (2019). Infografías. Consultado el 24 de julio de 2019. <http://www.ricyt.org/infos>

Educación en ingeniería para el siglo XXI

El país ha formado ingenieros de alta calidad a lo largo de su historia. En el pasado, estos ingenieros fueron capaces de transformar el país y brindarles a sus conciudadanos la posibilidad de mirar hacia el futuro. Hoy en día, si bien buena parte de las escuelas de ingeniería del país han venido ajustando sus programas y tienen un importante reconocimiento nacional e internacional (que se ve reflejado en sus acreditaciones), pareciera que los rendimientos son decrecientes, o que sus egresados cada vez se comprometen menos con la transformación económica y social del país. ¿Cómo romper esta tendencia?

Vale la pena hacer la salvedad de que, en un mundo globalizado y conectado, puede resultar más atractivo trabajar en cualquier parte del mundo y hacer esfuerzos para lograr proyectos externos, y no solamente nacionales.

Es probable que, al copiar modelos internacionales de programas y métodos pedagógicos, hayamos perdido la visión de país. Las presiones por las acreditaciones de las instituciones académicas y de las carreras académicas de los profesores hacen que la solución de problemas “de frontera” sean más redituables que la preocupación por problemas nacionales, los cuales, para volverse “interesantes” en el ámbito internacional, requieren recorridos más largos.

También existe un alto grado de responsabilidad de los Gobiernos y los empresarios. Es necesario que la política macroeconómica considere el conocimiento y la innovación como factores de crecimiento económico. La asignación del 10 % de las regalías a programas de ciencia y tecnología fue un acierto, pero su ejecución, un fracaso. Hay que ajustar esta fuente de recursos y lograr que su asignación sea más eficiente y efectiva.

De parte de los empresarios, no hay credibilidad en la ventaja de invertir en innovación. Esto se ve reflejado en que solo 25 % de las empresas nacionales tienen alguna actividad o alguna preocupación al respecto (en 2016, de casi 8000 empresas manufactureras encuestadas en la EDIT, 14 son innovadoras en sentido estricto, 1708 lo son en sentido amplio y 285 son potencialmente innovadoras); además, pareciera que no hay confianza en las universidades nacionales, por alguna razón que debería determinarse. A su vez, la universidad no parece muy convencida de la necesidad de trabajar con la industria en problemas nacionales. El debate entre investigación y consultoría sigue vigente y no permite avanzar.

Se esperaría que si las empresas, la academia y el Estado definieran temas prioritarios para el país, se encontrarían mecanismos más claros para garantizar un apoyo continuado de largo plazo para la solución de problemas, seguramente “sencillos” en los inicios, pero progresivamente más complejos. De esta manera, se tendría una estrategia gana-gana-gana, ya que se beneficiarían la empresa, la universidad y el Gobierno. En el caso de la empresa, esta ganaría aliados de largo plazo, como la universidad, que invierte esfuerzos y conocimientos en la solución de los problemas locales y que forma profesionales sensibles y conectados con la realidad nacional; además, contaría con un Gobierno que reconoce estos esfuerzos con incentivos tributarios y apoyo financiero. Por su parte, la universidad ganaría al contar con una relación que garantizaría el financiamiento de la actividad de investigación y formación de posgrado (maestría y doctorado), y ofrecería a sus egresados la oportunidad de llevar sus conocimientos a la práctica y contribuir con nuevas soluciones o realizar mejoras a las medidas ya existentes. En cuanto al Gobierno, este se beneficiaría al contar con inversiones productivas y cumplir con las metas de inversión en C+T (las cuales será más estrictas cuando se formalice el ingreso a la OCDE).

Por otro lado, con relación al tema de la energía, son muchas las ingenierías tradicionales que aportarían a hacer posible la transformación energética. Se requiere que estos programas den unas bases sólidas sobre las cuales se puedan agregar y construir conocimientos más especializados. Estos van

a cambiar constantemente, y, por lo tanto, la necesidad de actualización es evidente. Se requiere que los profesionales tengan gran capacidad de aprendizaje, lo cual es posible gracias a las bases proporcionadas en la formación de pregrado.

Es deber de las escuelas de ingeniería seguir manteniendo los altos estándares de calidad que les confieren los sistemas de acreditación nacional e internacional. Sin embargo, se debería repensar la aproximación a los problemas nacionales y al hecho de que los ciudadanos sean capaces de transformar la sociedad. Estas escuelas, además de estar mirando lo que se hace en el ámbito mundial en los programas y en la parte pedagógica, deben revisar por qué ya no tienen el impacto que otrora tuvieron en nuestra sociedad. Muchas escuelas han buscado una formación de ingenieros eruditos sin un compromiso de transformación económica y social que lleve a que el país progrese.

Instituciones como la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI) y la Asociación Colombiana de Ingenieros (ACIEM), en conjunto con las universidades, deberían hacer un estudio crítico de las causas de que las formadas en nuestras universidades no hayan logrado mayores impactos en la transformación de este país en los últimos veinticinco años. ¿Existe acaso algún tipo de frustración de los ingenieros de las diferentes escuelas de ingeniería en el país con respecto al entorno social? Claramente, sin un entorno favorable es difícil aportar al desarrollo económico de Colombia. Sin embargo, este ha sido el destino trágico de todas las generaciones de ingenieros colombianos; y en otra época, sí se pudieron hacer grandes transformaciones en diferentes áreas (por ejemplo, en el sistema eléctrico nacional). Entonces, quizás nuestra realidad sea consecuencia de tratar de copiar modelos ajenos y clasificar el conocimiento en áreas específicas, lo que a su vez, ha causado la pérdida progresiva de la multidisciplinariedad que tenían los ingenieros de antaño.

Una forma de proponer nuevas soluciones innovadoras y disruptivas es por medio de la investigación. Es por ello que las instituciones que le apuestan a la investigación deberían desarrollar programas de posgrado que brinden una visión de largo plazo a sus egresados. Esto se logra si los estudiantes, ya graduados como ingenieros, cuentan con bases sólidas de pregrado, ya que podrán ser capaces de apropiarse de nuevo conocimiento interdisciplinar. Dentro de esta formación de posgrado, que es vital para el desarrollo de un país, los doctorados juegan un papel fundamental. Según una encuesta reciente del Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, en el periodo 2008-2017, se graduaron en el país 3727 doctores (888 en ingeniería), 115.832 magísteres (15.883 en ingeniería) y 1'551.588 profesionales. El número de doctores es de 12,6 por millón de habitantes, lo cual es bastante bajo para un país de economía media con una población como la colombiana.

Finalmente, los empresarios son conscientes de la baja proporción de firmas con actividades innovadoras y quisieran cambiar la situación. Para que la productividad y el crecimiento se logren, se requieren políticas que promuevan la innovación. Sin embargo, se necesita una masa crítica de personas de altísima capacidad, la cual está emigrando en busca de nuevas oportunidades.

Para solucionar estos problemas, una de las apuestas que podrían hacerse en las universidades cuya misión sea la investigación es fortalecer las escuelas de posgrado que se financien a partir de la investigación. Para ello, es necesario entender cuáles son los problemas que tienen las empresas y por qué no aprovechan para su solución las capacidades nacionales ni se apoyan en las universidades nacionales mediante un financiamiento de actividades conjuntas. ¿Acaso estos gerentes e ingenieros no se graduaron en universidades nacionales? ¿Por qué no confían en el talento que se tiene en ellas? Cabe recordar que, una década atrás, varios de estos gerentes definieron el tema de la energía como uno de los temas prioritarios en los que querían generar centros de investigación estratégica.

Otra estrategia sería aunar esfuerzos entre la academia, la industria y el Estado; así, las investigaciones que resulten de las maestrías (con los énfasis que cada institución quiera darles) podrían recibir un impulso que les permita a los ingenieros creadores transformar el país mediante la generación de industria y nuevas oportunidades en el sector. El fortalecimiento de las escuelas de posgrado en temas claves para el país, junto con la participación activa de la empresa privada, han logrado impulsar la economía de diferentes países. Además, en estas escuelas de posgrado se forman doctores, los cuales deberían vincularse a la industria para que aporten a la creación de departamentos de investigación y desarrollo. Con ello se podría alcanzar un mejor entendimiento de los problemas locales, y se esperaría que Colombia dejara de tener una alta dependencia de otros países en cuanto a su desarrollo tecnológico.

Al respecto, las dos misiones que desarrolla el Gobierno (la de Sabios y la de Transformación Energética) ofrecen una oportunidad para hacer un planeamiento gana-gana-gana. Se propone que se faciliten las discusiones críticas con las empresas y las universidades para identificar y evaluar las fallas y dificultades frente a la transformación social e industrial. Los resultados de esta reflexión serían un insumo importante para los Ministerios de Educación y de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Después (o en paralelo) del análisis de las dificultades, para lograr una contribución mayor de la ingeniería en general, es necesario definir y poner en marcha las acciones y las fuentes de financiamiento continuado (véanse las recomendaciones en la página 30 de este documento) para mantener una formación doctoral de calidad que aporte a la solución de los problemas y los retos transformacionales identificados y propiciar una investigación y una innovación que contribuyan a mejorar la productividad de la economía.

Finalmente, las empresas deben fortalecer las acciones de innovación, para ofrecer espacios atractivos y retadores de creación y transformación y lograr que los ingenieros no se convierten más en gerentes o gestores de proyectos, sino más bien en transformadores de la sociedad. No es razonable continuar perdiendo talento humano valiosísimo que seguirá buscando oportunidades fuera del país, a pesar de las contribuciones que el trabajo en red podría traer. Así mismo, las universidades deben adaptar sus requisitos y esquemas para que el trabajo con la industria y los sectores productivos y del Gobierno sea posible.

**Inequidad
territorial
y zonas no
interconectadas**

Análisis económico y ambiental de las ZNI en Colombia

Introducción

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas (IPSE) es el encargado de atender las necesidades energéticas de los colombianos que no cuentan con el servicio de energía eléctrica. El IPSE ha identificado alrededor de 1850 comunidades que cuentan con el servicio de energía eléctrica, pero que no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) (Minenergía, IPSE y CNM, s. f.). Estas comunidades son clasificadas dentro de las zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia.

La mayoría de las comunidades que son parte de las ZNI están monitoreadas por el Centro Nacional de Monitoreo (CNM). Debido a esto, las ZNI se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo con la forma en la que se obtiene la información de su operación. El primer grupo tiene 1720 comunidades que no cuentan con servicios de telemetría. Estas comunidades envían información acerca del estado del servicio por vía telefónica. El segundo grupo tiene alrededor de 90 comunidades que cuentan con servicios de telemetría para reportar las condiciones de operación del sistema eléctrico. Estas comunidades están conectadas por vía satelital con el CNM y envían información horaria de su operación. El tercer grupo está compuesto únicamente por 37 comunidades, las cuales están conectadas a las comunidades que cuentan con telemetría (Minenergía, IPSE y CNM, 2018).

Otra clasificación que puede hacerse de las ZNI es la que propone la Resolución 181272 de 2011. Esta resolución propone tipificar las comunidades de las ZNI de acuerdo con el número de usuarios que las componen. Usando esta clasificación, las ZNI sin telemetría son clasificadas como se muestra en la tabla 1. Considerando el número de comunidades con y sin telemetría, así como la clasificación propuesta por la Resolución 181272 de 2011, se construye la figura 1, en la que se presenta un resumen de las dos clasificaciones.

Tipo	Descripción	Comunidades	Usuarios
1	Más de 300 usuarios	0	0
2	Entre 151 y 300 usuarios	148	26064
3	Entre 51 y 150 usuarios	931	69830
4	Hasta 50 usuarios	641	19825

Tabla 1. Clasificación de las ZNI sin telemetría
Fuente: IPSE y Ministerio de Minas y Energía. (2019).

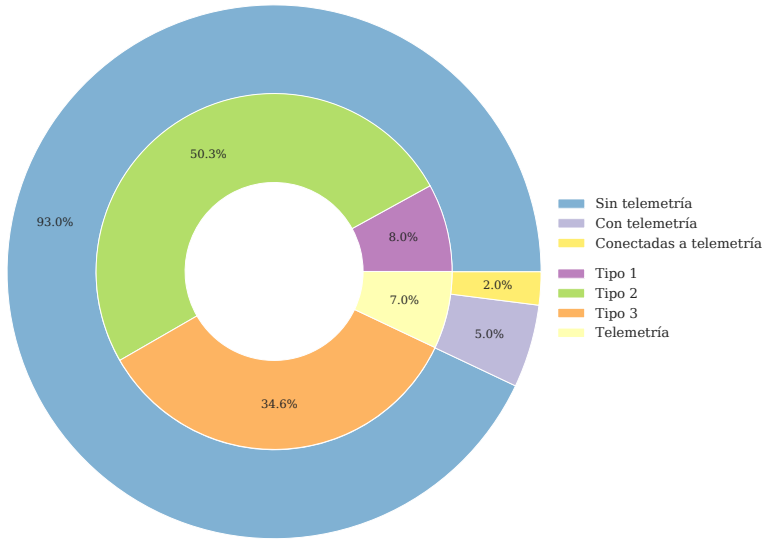


Figura 1. Clasificación de las ZNI de acuerdo con la presencia o no de telemetría y con el tipo de comunidad
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, las comunidades que cuentan con telemetría proporcionan información horaria acerca de sus consumos de energía eléctrica. La información es almacenada por el CNM y es de conocimiento público. La figura 2 presenta los consumos mensuales promedio de energía eléctrica registrados en 2018.

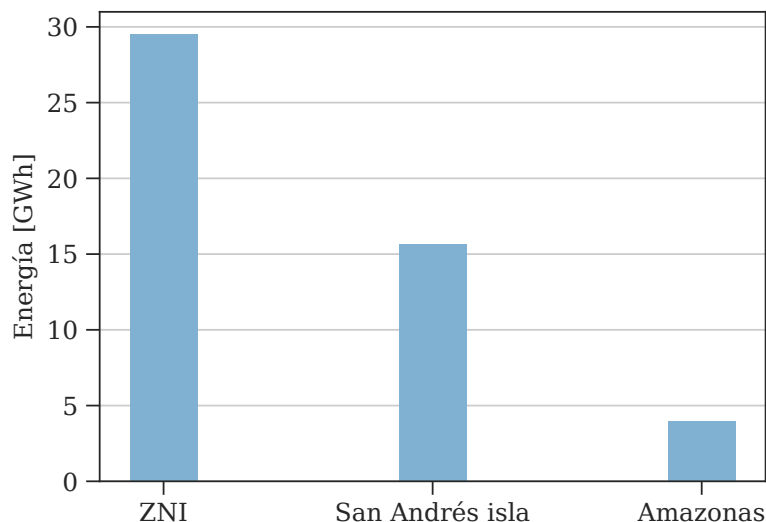


Figura 2. Consumo promedio mensual de energía eléctrica en las ZNI durante 2018

Fuente: Elaboración propia.

Pago de subsidios

Las ZNI se caracterizan por estar conformadas por poblaciones aisladas geográficamente, integradas en su mayoría por estratos 1 y 2. De acuerdo con el artículo 368 de la Constitución Política de Colombia y con el Decreto 847 de 2001, la nación deberá proporcionar subsidios para el servicio de energía eléctrica a los usuarios de estratos 1 y 2. Esto ha hecho que el Gobierno pague los subsidios presentados en la figura 3 durante los últimos 6 años (Minenergía, s. f.).

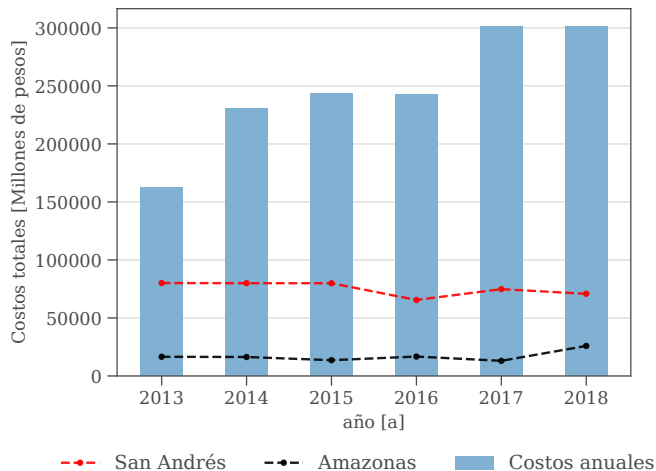


Figura 3. Evolución anual del pago de subsidios para las ZNI
Fuente: Elaboración propia.

Problemática

El servicio eléctrico en las ZNI se suple en un 93,6 % mediante generación de energía eléctrica con sistemas basados en combustión diésel, lo cual representa un consumo aproximado de 55.000 barriles por mes de este combustible. Este alto consumo de diésel genera gases de efecto invernadero debido a su combustión; además, representa altos costos para el Estado por el pago de subsidios.

Solución planteada

La instalación de sistemas de generación de energía eléctrica híbridos renovables, en lugar de sistemas de generación diésel, puede llevar a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la disminución de los pagos de subsidios para la energía eléctrica por parte del Gobierno. A continuación, se plantean tres escenarios que podrían ayudar a mitigar los impactos del alto consumo de diésel en las ZNI. Para determinar las ventajas y desventajas de cada escenario, se realizaron diferentes

simulaciones usando como caso de estudio el dimensionamiento de una microrred hipotética ubicada en la longitud 77° 16'8" oeste y latitud 5° 41'36" norte (Nuquí, Colombia). La microrred estará compuesta por paneles fotovoltaicos (PV), un sistema de almacenamiento de energía de batería (BESS), un generador diésel (DG) y un sistema de gestión de la demanda de control directo. El sistema de gestión de la demanda reduce la carga un 10 % en la franja horaria de las 18:00 a las 21:00 horas. La carga máxima de la microrred considerada es de 460 kW. La disponibilidad de recursos primarios fue obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). El promedio global de irradiación horizontal (GHI) en Nuquí es de 3,5 kWh/m². El costo del diésel utilizado para las simulaciones es de 0,79 dólares por litro.

Los tres escenarios considerados son los siguientes:

- Instalación de sistemas de generación eléctrica híbridos renovables para las ZNI.
- Instalación de sistemas de generación eléctrica híbridos renovables para las ZNI considerando estrategias de gestión de la demanda.
- Instalación de sistemas de generación eléctrica completamente renovables para las ZNI.

Análisis de los escenarios propuestos

Primer escenario

El primer escenario contempla la instalación de sistemas de generación eléctrica híbridos renovables para las ZNI. Esta solución requiere la hibridación gradual de los sistemas de generación actuales instalados en las ZNI.

Ventajas

- Aumento de las horas de servicio eléctrico para las comunidades.
- Aumento de la calidad y confiabilidad del servicio.
- No es necesario desmontar los generadores diésel que existen actualmente en las ZNI.

Desventajas

- Incremento de costos de instalación de nuevos proyectos.
- Incremento de costos de instalación de los proyectos en funcionamiento.

Segundo escenario

El segundo escenario contempla la instalación de sistemas de generación eléctrica híbridos renovables para las ZNI con la inclusión de estrategias de gestión de la demanda. Esta solución requiere la mejora gradual de los sistemas de generación de energía eléctrica actuales instalados en las ZNI. Adicionalmente, es necesario realizar jornadas educativas acerca de las ventajas que pueden representar los mecanismos de gestión de la demanda para las comunidades donde se instalen este tipo de proyectos.

Ventajas

- Mayor conciencia de un uso adecuado de la energía eléctrica por parte de los usuarios.

- Aumento del uso racional de la energía.
- Mejoras en la eficiencia energética de los procesos productivos.
- Reducción en los costos de energía eléctrica suministrada a los usuarios.
- Aumento de las horas de servicio de energía eléctrica para las comunidades.
- Aumento de la calidad y confiabilidad del servicio de energía eléctrica.
- No es necesario desmontar los generadores diésel que existen actualmente en las ZNI.

Desventajas

- Costos relacionados con las jornadas de educación y socialización de los mecanismos de gestión de la demanda.
- Depende de la respuesta de los usuarios frente a la gestión de la demanda.
- Incremento de costos de instalación de nuevos proyectos.
- Incremento de costos de instalación de los proyectos en funcionamiento.

Comparación de los dos primeros escenarios

Los dos primeros escenarios presentan mayores ventajas económicas y ambientales con respecto a los sistemas que funcionan únicamente con diésel. La figura 4 expone una reducción del valor presente neto, de los costos anuales y de la inversión inicial de los sistemas híbridos con respecto a los sistemas diésel. La figura 5 presenta una reducción de las emisiones contaminantes de los dos primeros escenarios con respecto al sistema actual. Por último, la figura 6 ilustra las reducciones de los subsidios pagados por el Gobierno por motivo del consumo de diésel.

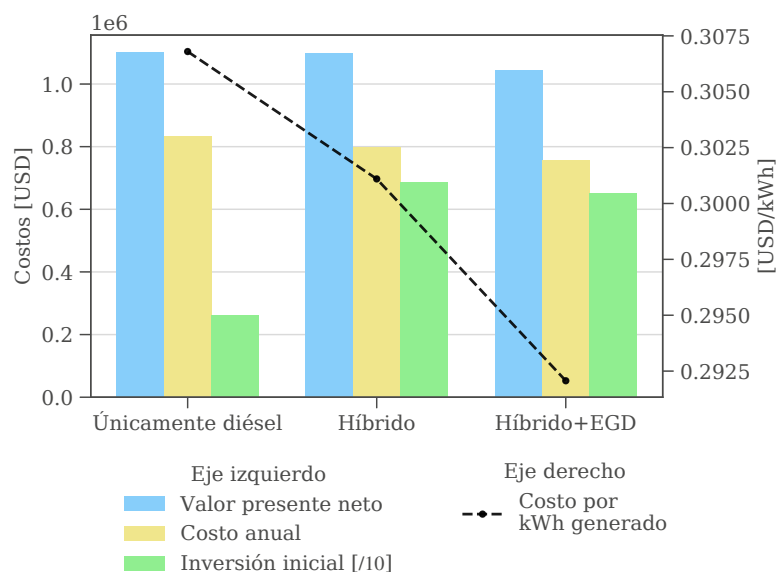


Figura 4. Comparación de costos de los dos primeros escenarios
Fuente: Elaboración propia.

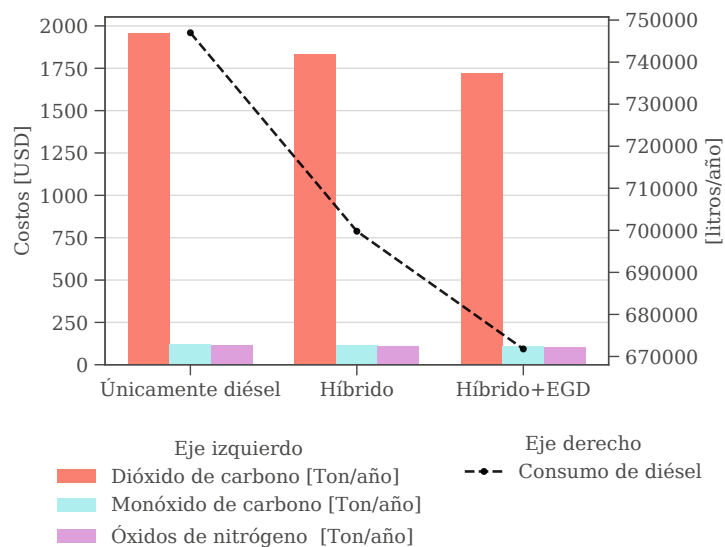


Figura 5. Comparación de emisiones contaminantes de los dos primeros escenarios

Fuente: Elaboración propia.

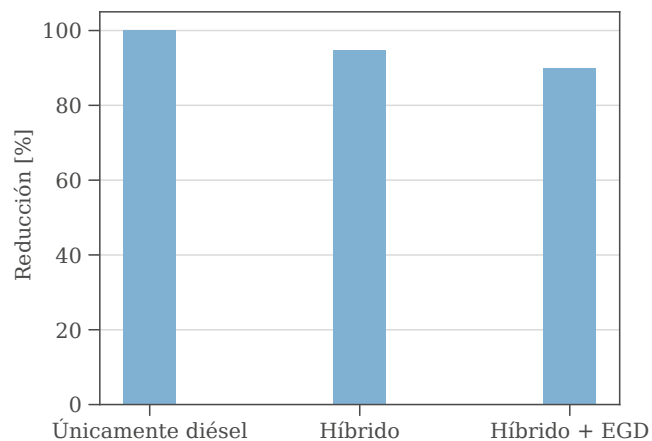


Figura 6. Comparación de los subsidios pagados por el Gobierno de los dos primeros escenarios

Fuente: Elaboración propia.

Tercer escenario

El tercer escenario contempla la instalación de sistemas de generación eléctrica solamente con fuentes renovables para las ZNI. Esta solución requiere reemplazar completamente los sistemas actuales por sistemas que dependan exclusivamente de fuentes de generación de energía eléctrica renovable. Las emisiones durante la operación de un proyecto cien por ciento renovable pueden ser consideradas como nulas, al igual que el pago de subsidios.

Ventajas

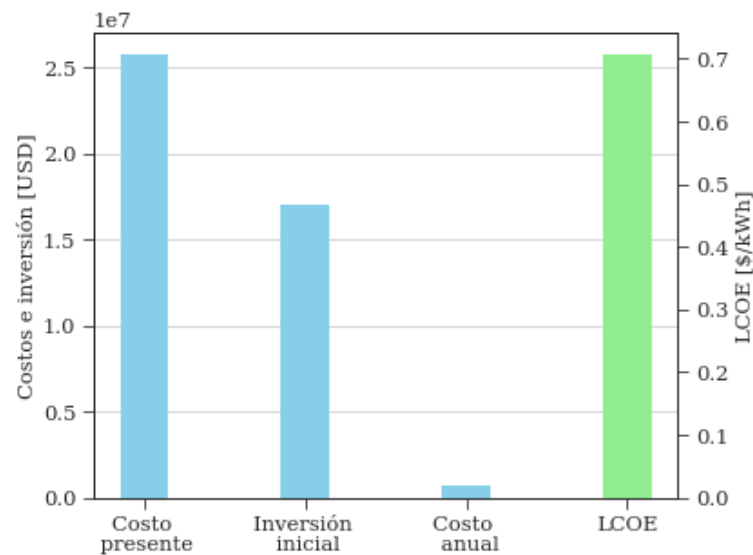
- Eliminación total de las emisiones de gases contaminantes.
- Eliminación total del pago de subsidios.
- Aumento parcial de las horas de servicio eléctrico para las comunidades.
- Aumento parcial de la calidad y confiabilidad del servicio.

Desventajas

- Incremento de costos de instalación de nuevos proyectos.
- Es necesario desmontar los generadores diésel que existen actualmente.

La figura 7 presenta los costos de la instalación de un proyecto cien por ciento renovable.

Figura 7. Costos del escenario puramente renovable
Fuente: Elaboración propia.



Conclusiones

Los resultados presentados en el informe fueron obtenidos únicamente considerando un caso de estudio. Antes de sacar conclusiones sobre cuál es la mejor política de acción frente a la problemática, se deben analizar más casos de estudio. Alrededor de 90 comunidades cuentan con servicios de telemetría. Se aconseja realizar el mismo estudio en el 60 % de estas comunidades, antes de poder obtener conclusiones al respecto.

Sin embargo, el caso de estudio sirve para vislumbrar los efectos que se esperan si se desarrolla alguno de los escenarios propuestos. El escenario donde se considera la hibridación de los sistemas de generación diésel con generación renovable y gestión de la demanda parece ser el más prometedor. La implementación del control directo de la demanda logró reducir los costos y las emisiones del caso de estudio comparado con la hibridación sin gestión de la demanda. Sin embargo, el control directo

no es la única estrategia de gestión de la demanda que existe. Diferentes alternativas pueden ser evaluadas; para ellas se esperan diferentes resultados. Estrategias de tarificación dinámica, incentivos económicos, acuerdos entre el operador de red y los usuarios y muchas otras estrategias pueden ser evaluadas. Una vez hecho esto, se podrá concluir cuál de todas tiene mayor potencial de reducción de costos y de emisiones contaminantes para las ZNI en Colombia.

Adicionalmente, es válido resaltar que el caso estudiado consideró únicamente la instalación de un sistema solar fotovoltaico y baterías para su hibridación. Sin embargo, en Colombia existe gran disponibilidad de diferentes recursos de generación primarios. La integración de recursos hídricos, biomasa o gas natural entre otros podría presentar reducciones más significativas en el pago de subsidios por parte del Gobierno para las ZNI. Se recomienda también realizar estudios adicionales en esta dirección.

Referencias

- Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas y Centro Nacional de Monitoreo. (2018). *Reporte gerencial enero-diciembre 2018. Demanda de energía acumulada anual ZNI*. http://190.216.196.84/cnm/no_telemetria.php?v1=REPORTE%20GERENCIAL%20ENE%20DIC%202018.pdf
- Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas y Centro Nacional de Monitoreo. (s. f.). *Informes mensuales de operación, 2013-2020*. http://190.216.196.84/cnm/info_mes.php
- Ministerio de Minas y Energía (s. f.). *Subsidios Zonas No Interconectadas, ZNI*. <https://www.minenergia.gov.co/subsidios-zonas-no-interconectadas>

Concepto de equidad territorial

Las dimensiones del ordenamiento territorial en un país explican en parte los múltiples conflictos existentes; de estos se destacan los conflictos entre intereses privados e intereses públicos, dado que el tema del territorio resulta crucial para la construcción de ciudadanía y el desarrollo productivo, equitativo y sostenible del país. El ordenamiento territorial y el problema de la equidad en el país son temas ausentes pero urgentes en Colombia; «el desarrollo, la equidad y el bienestar dependen en gran medida de un adecuado ordenamiento territorial. Pero Colombia no lo ha hecho, y no parece algo primordial para el Estado» (Saldías, 2018).

En los últimos años, el Estado no ha dado una mirada o una propuesta comprensiva y explícita sobre la equidad y el ordenamiento territoriales en sí mismos, que en efecto son condiciones necesarias y decisivas para el crecimiento económico y el bienestar social. Por eso el hecho de que existan ciudades y campos desaprovechados o zonas productivas en estancamiento no es algo que esté atado al azar ni que sea un designio de la naturaleza, sino que es el resultado de las decisiones de los actores sociales, económicos y políticos responsables de adoptar el ordenamiento territorial equitativo. Los centenares o miles de instrumentos de planificación que han formulado hasta hoy las entidades territoriales no son más que declaraciones de buenas intenciones.

La equidad territorial hace referencia a la dimensión espacial de la justicia social, y busca designar una configuración geográfica que garantice a todas las personas las mismas condiciones de acceso a un territorio. Es

un concepto y un principio de ordenamiento que permite comprender las situaciones reales presentes en un territorio. Los orígenes del conflicto por la tierra y la conformación territorial en Colombia tiene su origen en el primer decenio del siglo XX; para entonces era visible la forma extensiva de patrones feudales sobre la propiedad de la tierra.

La conformación territorial en Colombia ilustra la manera en que las políticas de Estado han originado la exclusión de millones de campesinos bajo el sometimiento de los modelos de desarrollo aplicados en el país desde hace años. Las políticas, en vez de mejorar las condiciones de vida y satisfacer las necesidades de los habitantes de las zonas rurales, más bien los han llevado a someterse a diferentes escenarios en los cuales se evidencia su deterioro social. El territorio en Colombia representa aproximadamente el 30 % del PIB nacional, y concentra el 50 % de las capacidades nacionales en ciencia, tecnología e innovación. Además, la mayoría de las universidades colombianas están en el listado de las mejores del país, y dos de ellas se ubican entre las veinte primeras de América Latina. Así mismo, Colombia tiene sectores líderes en el ámbito nacional: agroindustria, industria y, sobre todo, servicios; de este último sector, hay algunos servicios TIC con valor agregado, como sucede en los ámbitos de la salud, la educación superior, la logística, las finanzas y el comercio, que no se han sabido aprovechar.

Según un estudio realizado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC, por su sigla en inglés) de Canadá, el Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural (Rimisp), y considerando que la medición de la inequidad en función de los ODS es un hecho novedoso y un motivo para generar valor agregado importante para el desarrollo, se necesita urgentemente evaluar las inequidades territoriales en los países, tal como es el caso de las comunidades en Colombia. El estudio hace una aproximación a la realidad colombiana con respecto a su inequidad territorial, y concluye que es uno de los peores casos de entre siete países

representativos de la región, de modo que está muy cerca del desempeño inferior de México y Guatemala, y solo es superado por Chile. Las causas de esta situación están relacionadas con las dificultades para enfrentar la pobreza en todos los territorios; basta ver los casos presentes en La Guajira y, en general, en las costas Atlántica y Pacífica, entre otros lugares del país. Hay dos asuntos adicionales que se destacan en el estudio: por un lado, Colombia registró el peor desempeño en inequidad territorial con respecto al acceso al agua, y, por otro, se valoran los buenos resultados que ha tenido el país en generación de empleo y crecimiento económico.

Los candidatos presidenciales han hablado, por supuesto, de numerosos problemas regionales y locales que aluden de manera directa o tangencial a problemas y procesos, como la descentralización, los programas de vivienda, la distribución de regalías o los impuestos sobre la tierra. En Colombia, durante los últimos quince años, no ha habido un programa o proyecto que refuerce o promueva la idea de enfrentar las inequidades y sus graves manifestaciones en el territorio, cuando menos en el plano formal. Aunque, desde el Gobierno de 2002 hasta hoy, los planes nacionales de desarrollo incluyen la palabra equidad cuando aluden el desarrollo que requiere el país, en la práctica no se evidencia un enfoque directo en la equidad territorial; en los planes tan solo se menciona la importancia de ese concepto y lo que genera alrededor de un territorio, pero no se encuentra un desarrollo o proyecto dirigido a solucionar los problemas de la disputa por un territorio. La equidad y el ordenamiento territorial deben estar en armonía con los propósitos que haya definido una sociedad a mediano y largo plazo, mas no con el deseo del gobernante de turno. El marco constitucional acerca del ordenamiento territorial nunca ha sido desarrollado, pese a las decenas de proyectos de ley de ordenamiento territorial existentes; de hecho, muchos de ellos no han sido tramitados, mientras que otros no han hecho aportes relevantes a la población.

El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, “pacto por Colombia, pacto por la equidad”, propone trazar el curso de acción para remover los obstáculos mencionados y transformar las condiciones que hagan posible acelerar el crecimiento económico y la equidad de oportunidades. El documento de bases del PND no presenta una visión general de la estructura de la descentralización y de los cambios de fondo que se deben realizar. Así mismo, la lectura del articulado, debido a su carácter disperso, no facilita tener una idea de conjunto, a pesar de que se plantea la conexión con los distintos territorios del país, estableciendo pactos regionales que son el medio que permite habilitar la apuesta de legalidad y emprendimiento para el logro de la equidad en todo el territorio colombiano. En estos pactos se identifican los proyectos estratégicos que permitirán dinamizar la economía y fomentar el desarrollo social, según la vocación y el potencial de cada región; así mismo, se señalan los esfuerzos focalizados en el ámbito territorial de algunos pactos transversales que responden a las particularidades de cada región.

La puesta en marcha de una política de equidad territorial implica hacer frente a las distribuciones inequitativas de las provisiones y del acceso a los servicios públicos y el empleo. Por tanto, un Gobierno con un enfoque de equidad territorial puede hacer frente a las inequidades territoriales, por medio de la definición de políticas públicas y la movilización de la capacidad instalada del Estado, así como de la priorización del gasto público. Son múltiples las medidas que el Gobierno nacional podría emprender para mejorar la situación de los territorios que han sido víctimas de la violencia y el abandono estatal, o que han estado al margen de los circuitos económicos, considerando que son los territorios las plataformas donde la innovación y el emprendimiento le imprimen dinamismo y transformación a la producción para generar oportunidades de manera difundida en la sociedad.

La innovación y el desarrollo productivo están dando un nuevo salto cualitativo en medio de un contexto de inequidad con crecientes brechas múltiples. El país debe transformarse desde el conocimiento y la producción, considerando a los territorios como plataformas de creatividad, innovación, producción y emprendimiento, para crecer y abatir inmensas brechas sociales y corregir acciones; estos procesos se sustentan en la calidad de la educación, en la cantidad y la calidad de la ciencia y la tecnología para la innovación multidimensional, así como en el impulso al emprendimiento multidimensional, que refleja y explica el potencial de cambio cultural con equidad. Si Colombia estructura las políticas de desarrollo productivo, ciencia, tecnología, innovación y emprendimiento, con una idea conceptual propia y correcta, dará un paso inmenso en su concepción del desarrollo, como nación y para sus territorios, y tendrá la solución a la inequidad territorial.

Los territorios son determinantes como escenarios en donde la innovación se expresa de manera singular, y donde la producción se desarrolla endógenamente y se generan condiciones para el bien común. Por ejemplo, a partir de la experiencia regional y de la mano del desarrollo científico, las tecnologías e innovaciones se transforman en un factor endógeno inimitable; no obstante, esto no es algo que surja de manera espontánea en el territorio, sino que depende de políticas nacionales correctas y de políticas regionales propias y duraderas. Por lo tanto, la innovación es un bien que puede y debe ser desarrollado por la sociedad con la ayuda del Estado. Los territorios pueden y deben hacer mucho más para disponer del mejor modelo de desarrollo regional; de ellos depende en gran medida lo que logren hacer como sociedad organizada y proyectada hacia el futuro.

La innovación tiene relación con el territorio, con sus características, y, por tanto, su atención recae más en las formas de surgimiento de la innovación que en la difusión del progreso técnico. En consecuencia, el desarrollo endógeno es fundamental porque es el resultado de una sociedad innovadora; por tanto, la innovación es la principal función que impulsa su desarrollo (Peyrache-Gadeau, 2006).

Referencias

- Barrera, I. M. (2019). *Educación superior y equidad regional en Colombia*.
- Castillo, J. B. (2016, 12 de marzo). La equidad territorial es la base de la equidad económica y social. *El telégrafo*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/la-equidad-territorial-es-la-base-de-la-equidad-economica-y-social>
- Bret, B. (s. f.). *Equidad territorial*. Consultado el lunes 30 de noviembre de 2020. <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article560>
- Departamento Nacional de Planeación. (2019, 10 de marzo). *¿Qué es el Plan Nacional de Desarrollo?* <https://www.dnp.gov.co/Plan-Nacional-de-Desarrollo/Paginas/Qu-es-el-PND.aspx>
- Departamento Nacional de Planeación. (s. f.). *Retos del ordenamiento territorial para el desarrollo del país*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/9 COT.pdf>
- Pérez Martínez, M. E. (2004). La conformación territorial en Colombia: entre el conflicto, el desarrollo y el destierro. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, (51), 1-30. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/desarrolloRural/article/view/1272>
- Maldonado Copello, A. (2019, 29 de abril). La descentralización territorial en el proyecto de articulado del Plan Nacional de Desarrollo. *Revista Sur*. <https://www.sur.org.co/la-descentralizacion-territorial-en-el-proyecto-de-articulado-del-plan-nacional-de-desarrollo/>
- Portafolio. (2019, 5 de abril). Plan de Desarrollo deja de un lado la equidad territorial. *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/plan-de-desarrollo-deja-de-un-lado-la-equidad-territorial-528263>

- Acosta Puertas, J. (2017). Economía de la innovación, territorios y equidad para Colombia. *Friedrich Ebert Stiftung*.
- Restrepo, J. M. (2018, 17 de marzo). Prioridad nacional: la equidad territorial. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/opinion/prioridad-nacional-la-equidad-territorial-columna-745007>
- Saldías, C. (2018, 7 de mayo). *Ordenamiento territorial: un tema ausente pero urgente en Colombia*. <https://www.razonpublica.com/index.php/econom-y-sociedad-temas-29/11084-ordenamiento-territorial-un-tema-ausente-pero-urgente-en-colombia.html>

La inequidad territorial en Colombia

Las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia impiden que la población residente en esas regiones tenga un acceso a la energía eléctrica constante y de calidad, lo cual afecta directamente las condiciones de vida de sus habitantes. Así, la restricción en las oportunidades de educación, productividad y conexión con las zonas urbanas genera inequidad territorial en la sociedad colombiana. No es posible elevar los niveles de desarrollo de un país si se desestima la equidad territorial, en la medida en que no se implementan mecanismos para reducir la distancia, en términos de desarrollo económico y social, entre las grandes ciudades y los territorios más apartados del país.

Con respecto a esto, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) para las ZNI ha identificado que en el país alrededor de 1850 comunidades que cuentan con el servicio de energía eléctrica no están conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Las ZNI se clasifican en tres grupos de acuerdo con la forma en la que se obtiene la información de su operación. El primer grupo tiene 1720 comunidades que no cuentan con servicio de telemetría. El segundo grupo tiene alrededor de 90 comunidades que cuentan con servicio de telemetría para reportar las condiciones de operación del sistema eléctrico. El tercer grupo está compuesto únicamente por 37 comunidades, las cuales están conectadas a las comunidades con telemetría.

Se observa entonces que el 93 % de las comunidades no cuentan con telemetría. Ahora, si analizamos con respecto al tipo de comunidad, este porcentaje se divide de la siguiente manera: el 50,3 % es de tipo 2 (entre

151 y 200 usuarios), el 34,6 % es de tipo 3 (entre 51 y 150 usuarios), y el 8 % es de tipo 1 (hasta 51 usuarios). Por otro lado, solo el 7 % hace parte del grupo de telemetría, siendo de este porcentaje, el 5% grupo con telemetría directa y el 2 % conectadas a comunidades con telemetría. Si bien en las ZNI se cuentan con soluciones locales de generación, en muchos casos estas soluciones no son asequibles ni suficientes para las comunidades, y, por lo tanto, estas se sienten abandonadas por el Estado; esto hace que la inequidad territorial sea cada vez más significativa en el país.

El caso de Milton Dávila es el mejor ejemplo de que en pleno siglo XXI se siguen presentando desigualdades en las regiones colombianas. Dávila vive en una pequeña población ubicada en el sur del Choco llamada Sipi. Él debe conectar diariamente sus electrodomésticos con el temor de que el foco amarillo que ilumina su vivienda se apague en cualquier momento, pues en su población la energía se activa cada 17 horas; a las 6 de la tarde apenas una luz tenue empieza a iluminar la comunidad. Los habitantes de esta pequeña población, a la que solo se puede llegar por medio de vida fluvial, debido a la falta de carreteras que la comuniquen con otros municipios del departamento, aseguran que, con el pasar de los años, se adaptaron a vivir con pocas horas de energía eléctrica durante el día. Sipi es una de las poblaciones colombianas de 1710 localidades rurales que permanecen a oscuras casi todo el tiempo, donde se calcula que 128.587 personas solo acceden al servicio entre 4 y 12 horas al día, según los datos del IPSE. El sistema educativo es precario; solo funciona en jornada diurna, y no hay suficiente corriente para las clases de informática. En esa comunidad prima el silencio; tan solo se oyen las voces de algunos niños que juegan en la pequeña cancha del pueblo y el sonido de las fichas del domino de los jóvenes. La población reclama desde hace años oportunidades laborales que jamás lleguen.

Los departamentos que encabezan la lista de las zonas más pobladas que no están conectadas a una red eléctrica, en pleno siglo XXI, son Nariño, con 600 localidades; Chocó, con 509 localidades; Cauca, con 189 localidades, y el Valle del Cauca, con 81 localidades. Las entidades y las universidades ya están precisando los avances en las distintas ZNI; el uso de la energía renovable ya ha empezado a extenderse, pero la falta de inversión, además de la falta de comunicación social y práctica de todo el Estado, es un factor que impide su avance en las comunidades. Por ahora, estas comunidades se mantienen a la espera de la guía del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, con la esperanza de que les den soluciones a las ZNI y se reduzca la inequidad territorial derivada.

Lo mencionado anteriormente evidencia que es tiempo de hacer gestiones claras con respecto a la equidad territorial que el país requiere; la conexión entre lo urbano y lo rural debe ser considerado como un factor primordial para el Estado e indispensable para el crecimiento óptimo de Colombia. La ciencia, la tecnología y la innovación avanzan cada día más, la creación del nuevo ministerio por parte del Gobierno este año deberá enfocar uno de sus objetivos en dar solución a la inequidad territorial que vive el país; no se puede admitir que una parte de la sociedad se sienta aislada, pretendiendo que cuando el Estado se acerque a ella esta lo reciba y le entregue sus tierras. Tal como lo planteó la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las áreas rurales tienen un gran potencial de crecimiento económico vinculado a la producción alimentaria en los países en desarrollo, y los jóvenes no deberían tener que salir del campo para obtener empleo. Se necesita una profunda transformación del sector rural que permita aprovechar su potencial no solo para proveerle alimentos a una población creciente, sino también para generar empleo; esta es la clave para conectar a las zonas olvidadas en Colombia y para generar la equidad territorial en el país.

Nuevas realidades están derivando en una nueva senda de desarrollo, para que las economías emergentes incipientes, como es el caso de Colombia, se transformen a partir del conocimiento y la producción. Esto sin olvidar que los territorios pueden considerarse como escenarios de creatividad, innovación, producción y emprendimiento, para cerrar las inmensas brechas sociales y acometer acciones a favor del medioambiente. De esta manera, será posible generar nuevas relaciones entre las zonas rurales y urbanas. La generación de energía eléctrica híbrido-renovable es una posible solución para las ZNI en Colombia, a fin de reducir la emisión de gases y disminuir los gastos que presenta el Estado.

El primer paso para avanzar hacia la equidad territorial consiste en evaluar diferentes alternativas de solución para las ZNI, siempre buscando el bienestar de las comunidades y la eficiencia en costos. En este campo, la ciencia, la tecnología y la innovación complementan la generación de nuevas ideas sostenibles en las ZNI que evidencian la equidad territorial.

Referencias

- Castillo, J. B. (2016, 12 de marzo). La equidad territorial es la base de la equidad económica y social. *El telégrafo*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/la-equidad-territorial-es-la-base-de-la-equidad-economica-y-social>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2017, 13 de diciembre). *Hay que acabar con la inequidad estructural de las zonas rurales de América Latina para avanzar hacia un futuro mejor*. <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1072741/>
- Naciones Unidas. (2017, 9 de octubre). *Las zonas rurales son clave para el crecimiento económico de los países en desarrollo, dice la FAO*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/10/las-zonas-rurales-son-clave-para-el-crecimiento-economico-de-los-paises-en-desarrollo-dice-la-fao/>
- Saldías, C. (2018, 7 de mayo). *Ordenamiento territorial: un tema ausente pero urgente en Colombia*. <https://www.razonpublica.com/index.php/econom-y-sociedad-temas-29/11084-ordenamiento-territorial-un-tema-ausente-pero-urgente-en-colombia.html>
- Vivas, J. (2019, 11 de febrero). Los lugares que aún viven sin energía eléctrica en Colombia. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-lugares-que-aun-viven-sin-energia-electrica-en-colombia-325892>

**Energías
sostenibles**

litro

Biomasa y carbón



El conocimiento del ser humano, entendido este como la capacidad del hombre para comprender su relación con el entorno, se convierte en la estrategia eficaz para lograr conservar la especie y garantizar a las generaciones venideras un futuro seguro, con energía y recursos. Poseer la sabiduría es garantía de mantener la autonomía para afrontar retos sin dependencias externas, sin restricciones y sin limitar los recursos que requieren los ciudadanos de un país.

La población en crecimiento demanda recursos para subsistir y alcanzar la equidad social y la estabilidad, desarrollos avanzados para tener una vida saludable, innovaciones para el diseño de procesos que transformen materias primas en productos de valor agregado, sistemas de transporte de alta eficiencia para una movilidad que no afecte el medioambiente. Un país solo será autónomo si genera su propio conocimiento; de lo contrario, será un eterno dependiente, con características de ser siempre un país pobre, con mentalidad basada exclusivamente en el comercio y no en la creación de valores.

El país debe desarrollar una estructura industrial que facilite la generación de nuevas alternativas avanzadas en todas las disciplinas; es el momento propicio para los colombianos que se han formado en su más alto nivel y tengan la oportunidad de hacer ciencia y tecnología con los recursos primarios; es hora de romper los paradigmas para pasar de una economía basada en las materias primas y los productos básicos a una que se sustente en productos de alto valor agregado. Cada vez el país va aumentando su masa crítica de grandes científicos, y sería justo abonarles el terreno y volverlo fértil, para que se queden en Colombia, desarrollen sus ideas, enfoquen aquí sus proyectos y le den identidad al país. Es necesario

ofrecerle al país la oportunidad de que reconozca que la solución a sus problemas está en el conocimiento científico propio sobre sus recursos y posibilidades, y no en el conocimiento que viene de fuera.

Los ejemplos en otros países, como Brasil, España, Malasia, Irlanda, Suecia, etc., apuntan a que se debe tener una estructura sólida de ciencia y tecnología para marcar un norte, aunar esfuerzos y aprovechar el capital humano altamente formado en la solución de problemas complejos que satisfagan las necesidades de una sociedad que valora la justicia y la paz. El común denominador de estos países es haber entendido que el desarrollo de una nación se basa en la transformación de sus productos en otros de alto valor agregado; en este sentido, Colombia es un país que posee una riqueza representada en sus recursos naturales de toda índole, los cuales cada día se ven amenazados porque no existe una directriz definida que oriente los esfuerzos de los investigadores hacia la búsqueda de soluciones interdisciplinarias de largo plazo. Es por eso que gran parte de la explotación de los recursos naturales de Colombia es liderada por empresas extranjeras.

El país requiere una industria con protagonistas que cambien su estructura mental basada en balances puramente comerciales de mínimo riesgo por otra fundamentada en la creación de nuevos conocimientos con alto riesgo, pero con mayores retribuciones económicas a largo plazo. Así mismo, necesita atacar el problema de las inundaciones y al mismo tiempo el de las sequías, desde una perspectiva holística. También requiere generar ideas para superar las deficiencias del abastecimiento de agua, energía y alimentos, con visión de equidad social, así como enfrentar la fragilidad del sector de la salud con generación de nuevos conocimientos. Esto significa que Colombia debe tomar el futuro con seriedad, anticipándose a los hechos, para que estos no la golpeen sin posibilidad alguna de defenderse.

Las instituciones de educación superior colombianas juegan un papel fundamental en el cumplimiento de los objetivos establecidos dentro del capítulo cuatro del Plan Nacional de Desarrollo (PND) actual. La

educación superior es el motor de generación de mecanismos efectivos que permitan cerrar la brecha social existente en lo que se refiere a igualdad social y crecimiento económico; por otra parte, es importante tener en cuenta que la historia y la diversidad geográfica nacional también han contribuido a la ampliación de tales brechas.

En cuanto a la educación, las estadísticas muestran que en Colombia la educación superior, independientemente de su calidad, solo cubre el 57 % de los municipios; de esta cobertura, el 64,60 % está concentrado en las principales regiones del país (Bogotá, Antioquia, Valle del Cauca y Santander), las cuales conforman tan solo el 10,62 % del territorio nacional, mientras que el restante 89,38 % corresponde a las regiones con menor densidad de población y cuya actividad principal está relacionada con la actividad agronómica. En el actual PND se estableció como meta para el 2018 que la totalidad de departamentos del país debían lograr como mínimo tasas de cobertura en educación superior superiores al 20 %. Sin embargo, en las regiones más apartadas, como la región oriental del país (Amazonas, Vaupés y Vichada), la cobertura no llega al 10 %, y en otras, como la región Pacífica, la calidad de la educación sigue siendo de baja calidad a tal punto que a la fecha no existen instituciones universitarias con acreditación de alta calidad en Nariño, Cauca y Chocó.

Esto significa que es imperativo implementar metodologías que mejoren el acceso, la oferta y la calidad de la educación superior en el país. Otros elementos que deben considerarse en el análisis de la desigualdad y la inequidad social y económica en Colombia son aquellos relacionados con el acceso a servicios públicos complementarios a la educación, como son la energía, el saneamiento ambiental y la salud pública.

En consecuencia, existe correlación directa entre la energía y el crecimiento económico, la calidad de vida y el desarrollo científico y tecnológico de una sociedad. Por lo tanto, el acceso a la energía se constituye en un factor de equidad social. También es importante resaltar que las regiones

donde hay menor cubrimiento de instituciones y programas de educación superior, en su mayoría, tienen como fuente de sustento las actividades de explotación agroindustrial; sin embargo, la baja competitividad de estos sectores también limita su crecimiento por falta de procesos I+D+i, lo cual se refleja en una reducción de oportunidades de desarrollo para los individuos de las regiones.

El problema de la energía en Colombia

Un ejemplo muy concreto de las dificultades que tienen las regiones en el país es el acceso limitado a la energía eléctrica; hay regiones en donde incluso es inexistente. Se sabe que el 52 % del territorio nacional no se encuentra interconectado eléctricamente a la red nacional; en consecuencia, la sostenibilidad de este servicio público está limitada. En la figura 1 se puede observar que existen varias causas que generan el problema de la vulnerabilidad del sistema de suministro de energía confiable y sustentable.

Las principales causas del problema energético en el país son el desaprovechamiento de los recursos disponibles, como la biomasa residual o de origen agroindustrial y del carbón; la ausencia de inversión por desconocimiento de las tecnologías y los deficientes estudios de complementariedad que permitan tomar ventaja de una canasta energética diversa y oportuna acorde a las circunstancias ambientales del momento. Este problema genera efectos relacionados con el deterioro ambiental y el cambio climático (liberación de gases de efecto invernadero y de otro tipo, como los que provocan la lluvia ácida), la deficiencia en el desarrollo económico-social (las zonas sin desarrollo no poseen energía), el desaprovechamiento de los recursos considerados como tesoros (la biomasa y el carbón son conjuntos de moléculas complejas y grupos de grafenos respectivamente encerrados), el desequilibrio de la canasta energética (se usan energéticos de manera irracional) y un círculo

vicioso entre el frágil desarrollo del agro y los altos precios de los insumos requeridos para ello (la importación de insumos es costosa, y esto impide el desarrollo industrial; a su vez, no es posible generar los insumos propios, porque el sector no está lo suficientemente desarrollado).

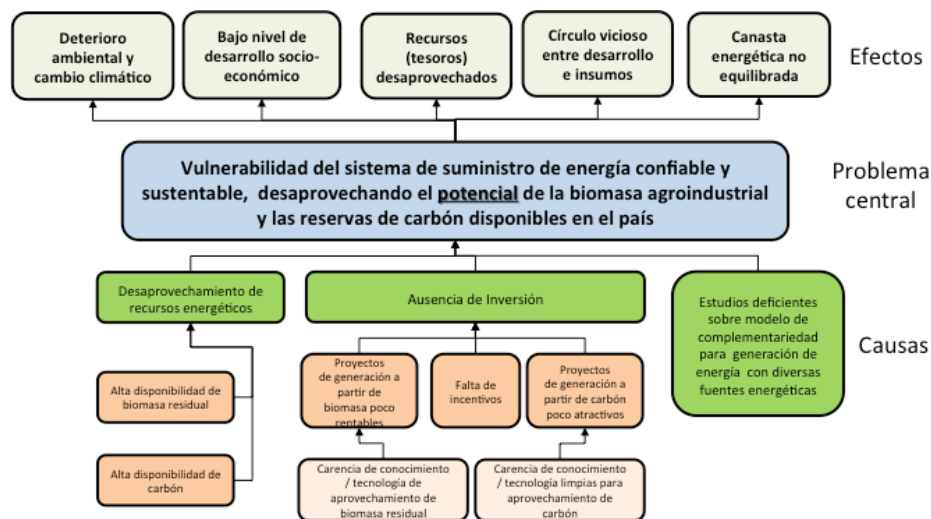


Figura 1. Mapa conceptual para ilustrar las causa y efectos del problema energético en el país

Fuente: Elaboración propia extraída de la propuesta elaborada por el autor “Strategy of transformation of the Colombian energy sector in the horizon 2030” funded by call 788 of the Science Ministry, Scientific Ecosystem, Contract number FP44842-210-2018

Sin embargo, el desarrollo de proyectos de I+D+i, desde las alianzas entre universidades, puede proveer a estas regiones las herramientas para la implementación de alternativas de abastecimiento eléctrico sustentable. Solo basta con observar que un país como Colombia posee un potencial de residuos agroindustriales de aproximadamente 72 MTON/año, equivalentes a 332.000 TJ/año de energía, que se encuentran disponibles a lo largo y ancho del territorio nacional, especialmente en las zonas con menor acceso a energía; esos recursos no son aprovechados energéticamente, y, por lo tanto, no se ha brindado una alternativa de disposición final sustentable de ellos.

Otra fuente de potencial aprovechamiento energético son los residuos urbanos, dado que de la suma de habitantes de las 5 principales ciudades del país (Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga), que reúnen el 36,28 % de la población, se generan casi 92.000 Ton/año sin contar los residuos industriales. Esta cantidad de residuos urbanos va en un 90 % a los rellenos sanitarios autorizados para ello; sin embargo, la mayoría de estos ya presentan limitaciones operativas.

El aprovechamiento de los residuos como fuente para la poligeneración de productos (electricidad, productos químicos y energía térmica) es una alternativa que debe ser viabilizada como solución sustentable para la disposición final de los residuos generados. La poligeneración, soportado en la pirólisis rápida de residuos agroindustriales, representa una oportunidad a corto plazo para dar valor agregado a recursos que en su mayoría tienen problemas de disposición final; y, además, de ella pueden obtenerse metodologías, prototipos y resultados medibles (caracterización, valoración social y económica) en ruta del escalamiento para la explotación industrial.

La poligeneración consiste en aprovechar varias tecnologías, como las que se observan en la figura 2, para generar simultáneamente productos de alto valor agregado y energía, bien sea térmica o eléctrica. El objetivo es que el país se oriente hacia la construcción de biorrefinerías para el aprovechamiento de la biomasa y también del carbón en la obtención de productos propios para las industrias farmacéutica, alimenticia, del agro, del transporte aéreo, etc.

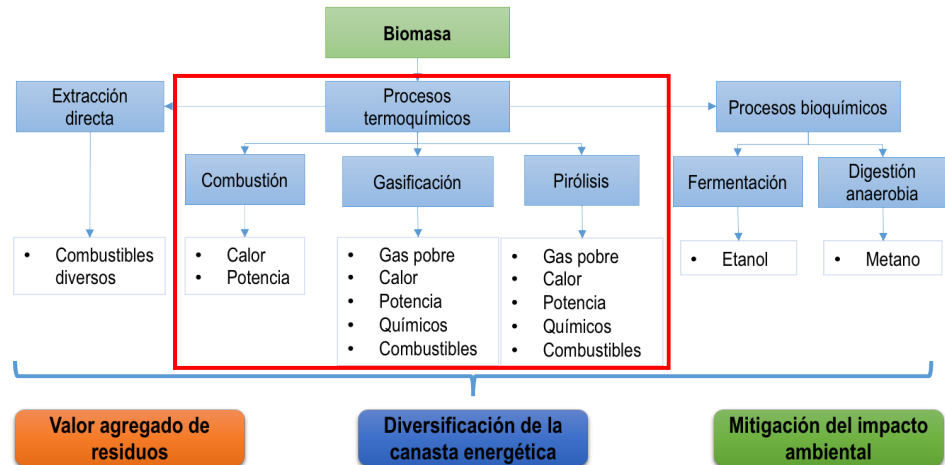


Figura 2. Esquemas ilustrativos de algunas tecnologías que se usan en esquemas de poligeneración o biorrefinerías

Fuente: Elaboración propia

El aprovechamiento de residuos agroindustriales puede convertirse, a mediano y largo plazo, en una solución para los problemas ambientales, sociales y económicos. Su implementación modifica el esquema general mediante el cual se ha desarrollado la agroindustria colombiana, y le ofrece a este y otros sectores las herramientas para obtener una mayor competitividad.

Adicionalmente, esta dinámica de investigación interinstitucional también debe permitir que las universidades se fortalezcan, tanto en calidad académica como en infraestructura para la investigación, mediante el establecimiento de una red colaborativa perdurable en el tiempo que beneficie especialmente a las regiones con mayor potencial (recursos) y menor nivel educativo.

Dilema de la transición energética

Según las estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (véase la figura 3), y sus pronósticos sobre la dependencia de los combustibles fósiles, estos seguirán siendo relevantes durante los próximos 20 años. En la actualidad, la participación de los recursos de origen fósil en la canasta energética mundial es del orden del 81 % con respecto a las otras fuentes, y se espera que sigan siendo relevantes en 2040; en los pronósticos más optimistas se prevé que el uso de estos recursos fósiles será del 50 %.

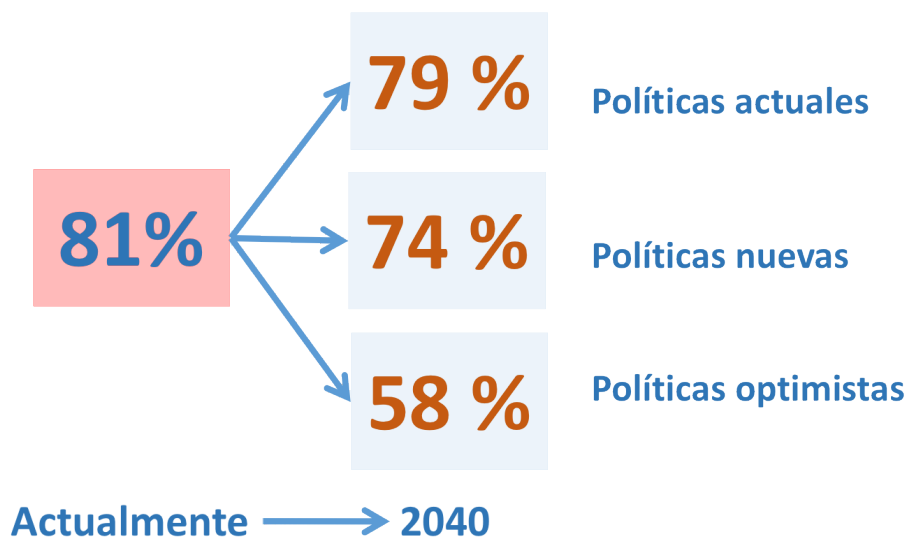


Figura 3. Consumo mundial de energía por recurso energético
Fuente: International Energy Outlook 2017, US EIA. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)

A pesar de un pronóstico simple, la dependencia de los combustibles fósiles seguirá siendo importante y nada despreciable para garantizar un sistema energético confiable y seguro. Por lo tanto, Colombia no puede dejar a un lado los combustibles fósiles, como el carbón, cuyas reservas pueden superar los 300 años; más bien, es imperativo sacar ventajas de este recurso y lograr usarlo de manera inteligente, con captura de dióxido de carbono para la producción de energía y productos de alto

valor agregado, como fertilizantes, gas natural sintético, diésel, amoníaco, metanol, carbón activado, grafenos, etc. Así mismo, se mantendrá la alta dependencia del sector hídrico en la canasta energética del país (cercana al 70 %); a esto se suman los efectos que el cambio climático ha generado sobre los fenómenos del niño (ENSO) y de la niña, que son cada vez más intensos y frecuentes, lo cual ocasiona riesgos inminentes, sobre todo, en las grandes centrales hidroeléctricas del país. Lo anterior da señales sobre la necesidad impetuosa de diversificar la canasta energética colombiana, que debe incluir el uso de fuentes de energía alternativa, como la solar y la eólica (si bien tienen muy baja disponibilidad, ofrecen grandes beneficios ambientales), acompañadas de los recursos energéticos que tienen mayor disponibilidad en el país, el carbón y la biomasa; estos últimos pueden ser soluciones complementarias ideales.

Mientras se inicia la generación de energía con fuentes renovables, así como con carbón y biomasa, el petróleo deberá seguir siendo la fuente energética que fortalezca el sistema energético, pero esta vez buscando especialmente el aprovechamiento de los recursos no convencionales, como los gases asociados a la explotación petrolera, sobre todo de aquellos que en la actualidad son quemados en tea y generan un gran impacto ambiental. El petróleo deberá seguir impulsando la economía en el país.

Una propuesta de transición energética en Colombia debe tener presente que el balance de energía en el país indica que la relación es cercana al 80 % del consumo como energía térmica y 20 % como energía eléctrica (UPME, 2019). De lo anterior se infiere que la transición no se debe centrar solamente en la electrificación del transporte y la generación de energía solar fotovoltaica y eólica, sino que debe ser más amplia en opciones de fuentes, pero sobre todo en los aspectos de eficiencia energética térmica.

La biomasa es un baúl lleno de tesoros por descubrir

Según la Unión Europea, la biomasa se puede definir de la siguiente manera:

material orgánico no fosilizado y biodegradable, que procede de plantas, animales y microorganismos, incluidos productos, subproductos, residuos y desechos de la agricultura, silvicultura e industrias relacionadas, así como las fracciones orgánicas no fosilizadas y biodegradables de residuos industriales y municipales, incluyendo también los gases y líquidos recuperados de la descomposición de material orgánico no fosilizado y biodegradable.

Otros autores presentan definiciones cercanas. Basu, por ejemplo, la define como cualquier material orgánico derivado de plantas o animales, o incluso como material que resulta de procesos o actividades desarrolladas por el ser humano, tal como se aprecia de manera esquemática en la figura 4.



Figura 4. Fuentes de biomasa
Fuente: <https://www.bioenergyconsult.com/biomass-energy-introduction/>

La biomasa, debido a sus diferentes orígenes, es considerada como una materia prima heterogénea, cuya composición fisicoquímica es variable, y que proviene principalmente de especies vegetales o animales, o bien de procesos de descomposición reciente. Este último aspecto la diferencia de la materia orgánica, que requiere millones de años de descomposición y que, mediante los procesos geológicos, resulta transformada en combustibles, como carbón y petróleo. La materia orgánica, como la madera o las plantas (biomasa lignocelulósica), es una fuente potencial de energía que se puede utilizar para generar calor, electricidad y combustibles líquidos.

La lignocelulosa se encuentra en la madera, la hierba, los residuos agrícolas, los residuos forestales y los residuos sólidos urbanos. De hecho, es el componente principal de este tipo de biomasa. La lignocelulosa se compone de tres tipos de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina (véase la figura 5). La celulosa es el componente más abundante en la estructura y consta de un polímero lineal de unidades de glucosa con enlaces β -1,4. La celulosa, cuya descomposición se presenta entre 300 y 400 °C, está estrechamente asociada con la hemicelulosa, que es un polímero ramificado compuesto de azúcares, tales como pentosas y hexosas, y que se descompone primero que la celulosa en un intervalo de temperaturas entre 200 y 300 °C.

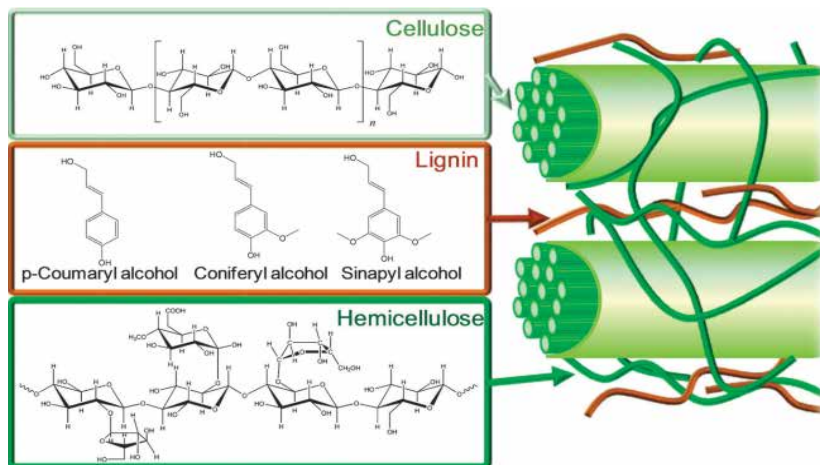


Figura 5. Componentes lignocelulósicos de la biomasa

Fuente: David Martín Alonso, Stephanie G. Wettstein and James A. Dumesic: *Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals*, *Chem. Soc. Rev.* 41 (2012) 8075–98. DOI: 10.1039/c2cs35188a

La lignina se produce a lo largo de la pared celular vegetal y se concentra principalmente en la lámina media y la pared celular primaria. Este polímero está formado principalmente por unidades de fenilpropano, que hace que el polímero sea un compuesto altamente complejo y recalcitrante; su descomposición es bastante lenta y empieza a partir de los 300-500 °C. Las composiciones y los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina varían dependiendo de las especies de plantas, pues estas generan particularidades en la estructura química de los polímeros, lo cual finalmente les confiere diferentes reactividades. Debido a la amplia gama de biomasa que se pueden utilizar para el tratamiento térmico, así como a su naturaleza heterogénea, la consideración y el análisis de su composición resulta crucial en cualquier tipo de diseño de proceso, ya que la degradación térmica está influenciada principalmente por la naturaleza química de los componentes de la biomasa.

La biomasa es atractiva y ha sido ampliamente usada desde la antigüedad como materia prima para la producción de energía. Desde el punto de vista de los procesos termoquímicos, presenta una gran ventaja, ya que su uso no incrementa los niveles de CO₂; esto se debe a las cantidades liberadas de este gas durante el proceso de transformación, las cuales son atrapadas por la biomasa en su ciclo de vida, de modo que se logra un balance de cero emisiones de CO₂. Además, con respecto a otras fuentes de energía renovables, tiene como ventaja su flexibilidad, ya que puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos.

El carbón, otro baúl lleno de tesoros por descubrir

El carbón se define como un combustible fósil formado a partir de la degradación de plantas o restos animales que fueron acumulados en deltas, manglares o zonas lodosas y alterados bajo condiciones geológicas de temperatura y presión durante millones de años. Técnicamente, el carbón es una roca sedimentaria, compuesta principalmente de macerales, material mineral, agua, hidrocarburos y gases contenidos dentro de las estructuras porosas. A partir de los restos de naturaleza heterogénea,

combinados con condiciones geológicas fluctuantes, se forman carbones de estructura heterogénea, con una amplia variedad de propiedades fisicoquímicas.

De acuerdo con el tipo de información suministrada, existen tres criterios para distinguir la estructura de los carbones (véase la figura 6):

- A. Estructura microscópica
- B. Estructura física o macroscópica
- C. Estructura química

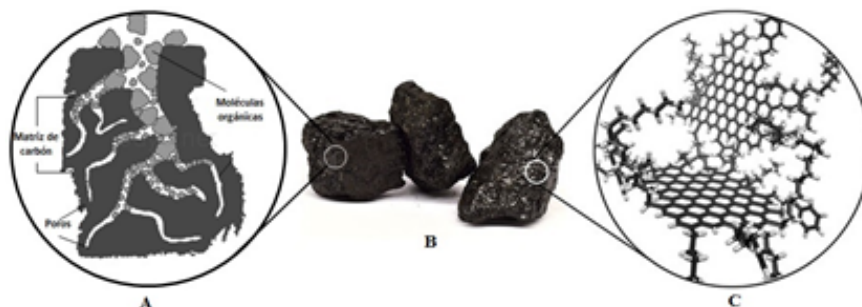


Figura 6. Ilustración de la estructura de carbón bituminoso.

Fuente: Adaptado de Ye, R. *et al.* (2013).

Hoy en día el carbón es la fuente de energía disponible con el potencial de suplir las deficiencias en la demanda de combustibles derivados del petróleo y el gas natural. Esto ha motivado el estudio y el desarrollo de tecnologías para su conversión en diversos tipos de combustibles, las cuales se han enfocado en la gasificación de materiales carbonosos para la producción de gas de síntesis (*syngas*, en inglés), una mezcla de CO , H_2 , CO_2 y trazas de CH_4 , o en la licuefacción directa para producir combustibles líquidos. Las tecnologías de gasificación son limpias, flexibles y seguras; lo cual las convierte en buenas alternativas para utilizar el carbón y la biomasa.

Actualmente, se desarrollan tecnologías de gasificación novedosas y más eficientes para asegurar mayores rendimientos de productos de alto valor agregado, tolerando las fluctuaciones propias del tipo y la calidad del material carbonoso. De allí la importancia de explorar los aspectos relacionados con la estructura y la reactividad de los carbones, además de sus interacciones con fenómenos de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento que ocurren tanto en partículas como en reactores.

La estructura física o macroscópica hace referencia al tamaño, la forma y la dureza del carbón. Entre tanto, la estructura microscópica alude al contenido y al tipo de macérales dentro del carbón, a la estructura microporosa y a la distribución de poros. Finalmente, la estructura molecular o química se relaciona con el arreglo y la orientación de los compuestos aromáticos unidos por enlaces alifáticos.

A escala macroscópica, una característica importante de los carbones es su apariencia bandeada o fragmentada. Estas fisuras o bandas consisten en irregularidades de capas alternadas de distintas macromoléculas con tamaños y orientaciones distintas, que parecen superficiales, y cuyos principales compuestos, desde el punto de vista de la petrografía, son denominados vitrinita, inertinita, liptinita. La identificación de estos grupos macérales es importante para determinar, de manera cualitativa, las características físico-químicas del carbón, como el orden de magnitud del poder calorífico, el rango del carbón, la reactividad y sus posibles usos. En la figura 7 se presentan de manera resumida algunos usos del carbón en términos del contenido de vitrinita presente.

Las estructuras microporosas tienen gran relevancia en el estudio y el desarrollo de muchas reacciones heterogéneas, como la gasificación. La distribución de tamaños de poros y las interconexiones entre ellos tienen especial efecto en los procesos de transferencia de masa de los agentes gasificantes u oxidantes (CO_2 , H_2O , O_2) hacia el interior de la partícula y, posteriormente, en el transporte hacia el exterior de los productos generados.

Figura 7. Usos y clasificación de carbones dependiendo del rango
Fuente: adaptado de Blandón (2013).

Rango del Carbón		Reflectancia de Vitrinita (Aleatoria)	Material Volátil, (% p/p) DAF	Humedad residual, (% p/p)	Poder Calorífico, Mú/kg	Generación de hidrocarburos	Principales usos	
Clase	Grupo							
Antracita	Meta - Antracita		2			Gas Seco	Instalaciones de calefacción Producción de químicos	
	Antracita	2.50	8					
	Semi - Antracita	1.92	14					
Bituminosos	Bituminoso Bajo en Volátiles	1.51	22			Gas Humedo	Producción de coque metalúrgico Producción de cemento Generación de potencia eléctrica y térmica	
	Bituminoso Medio en Volátiles	1.12	31					
	Bituminoso Alto en Volátiles A	0.75			32.6			
	Bituminoso Alto en Volátiles B				30.2			
	Bituminoso Alto en Volátiles C		0.60	46	8 - 10			26.8
	Subbituminoso A		52	25	24.4			
	Subbituminoso B	0.42	56	35	22.1			
Subbituminoso C			60	19.3				
Lignito A				14.7				
Lignitos	Lignito B					Gas de turbina	Generación de potencia eléctrica y térmica Producción combustibles líquidos y gaseosos sustitutos del petróleo Generación de potencia eléctrica y térmica Producción de carbonizados Instalaciones de calefacción	
	Turba		66	75				

La microporosidad también es importante en el desarrollo y el uso de los carbones activados o carbones con una amplia área superficial; estos son producidos mediante activación de materiales carbonosos, utilizando tratamientos térmicos con vapor de agua, gases de combustión, dióxido de carbono u otros, o por medio tratamientos ácidos (ácido fosfórico, sulfúrico, entre otros). En cualquier caso, la aplicación industrial dependerá de cómo se desarrolle la estructura porosa, la cual, a su vez, dependerá del tipo de carbón utilizado y las condiciones de operación para la activación. En la figura 8 se ilustra una imagen de un carbón activado, tomada por microscopia electrónica de barrido.

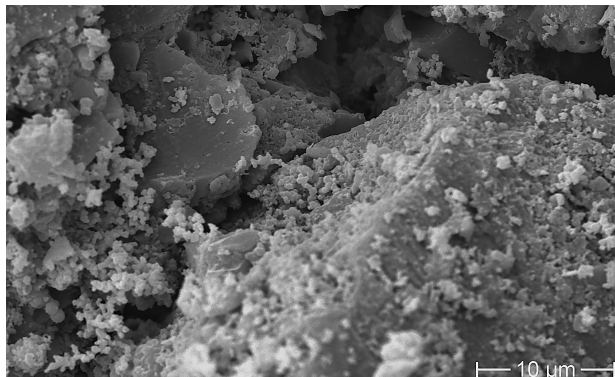


Figura 8. Estructura de un carbón activado.

Fuente: By Mydriatic - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30264504>

Desde el punto de vista molecular, el carbón está asociado con un arreglo de anillos aromáticos distribuidos de manera irregular y con un tamaño no definido. Hasta la fecha, existen numerosas propuestas para representar la naturaleza química del carbón en función del rango, tal como se aprecia en la figura 9. De estas estructuras, se puede dilucidar que, a medida que el rango del carbón aumenta, también lo hace el número de anillo bencénico; así mismo, cuando las estructuras se ordenan para lograr una apariencia plana y uniforme, el número de ramificaciones de las cadenas carbonosas cada vez se hace menor.

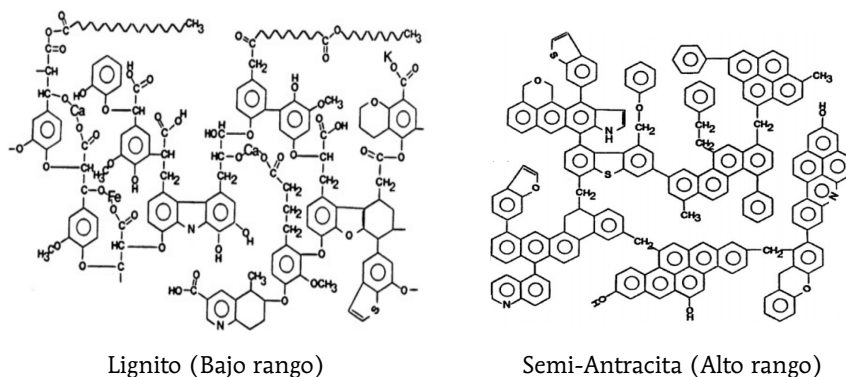


Figura 9. Estructuras moleculares propuestas para carbones de distinto rango

Fuente: adaptado de (Chejne et al., 2017), impreso con permiso de los titulares de derechos de autor

En la figura 9 se observa que el número de grupos funcionales, en especial aquellos que contienen oxígeno, van disminuyendo a medida que el rango del carbón aumenta. Desde comienzos de los años 70, se han reportado más de 100 tipos distintos de estructuras para el carbón [24-27], las cuales, en su mayoría, han sido desarrolladas para carbones bituminosos. El conocimiento de la estructura molecular del carbón es importante para entender los mecanismos de reacción, la predicción de la evolución de estructuras porosas y especies volátiles generadas, los cambios en las propiedades fisicoquímicas; lo anterior permitirá abrir el baúl para obtener los diferentes productos (más de 500) de alto valor agregado, que soportarán muchos sectores de la economía, como el agropecuario, el farmacéutico, el alimentario, entre otros.

Procesos termoquímicos para desarrollar y abrir el baúl del tesoro escondido

Los procesos termoquímicos usados para la conversión de la biomasa normalmente son procesos intermedios, proveedores de los componentes necesarios para un posterior aprovechamiento secundario en la obtención de energía térmica o eléctrica, así como de combustibles o productos de alto valor agregado. Los procesos termoquímicos, como la pirólisis, la torrefacción, la combustión y la gasificación, permiten la degradación de la biomasa mediante la aplicación de calor y un agente, como aire, oxígeno, CO_2 , aire enriquecido o vapor, que forma parte fundamental de las reacciones que ocurren en el proceso.

La pirólisis es la descomposición térmica de un sólido en atmósfera inerte, excepto en los casos en los que se permite una combustión parcial para proveer la energía térmica requerida en el proceso, lo cual da como resultado la producción de gases no condensables, un líquido (bioaceite o

alquitrán) y un carbonizado denominado biochar. En este proceso ocurre primero la evaporación de la humedad contenida en la biomasa (etapa de secado) y luego la liberación progresiva de volátiles que da como resultado el biochar (primera etapa de pirólisis), producto de ruptura térmica de los enlaces químicos de los componentes individuales de la biomasa, tales como celulosa, hemicelulosa, parte de lignina y extractivos.

Colombia cuenta, en la actualidad, con una variedad de residuos de origen agroindustrial con enorme potencial para ser aprovechados en la generación de energía, fertilizantes o productos de valor agregado. Según la UPME, hay alrededor de 72 MTon/año, con un potencial energético 11.828 MWh/año de residuos agroindustriales y de cosecha, 442 MWh/año de residuos de bosques plantados y 698 MWh/año de residuos de bosques naturales. Ante tal panorama, el aprovechamiento energético y químico de las biomásas residuales (residuos de cosecha y beneficio, residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros) disponibles en el país abre la oportunidad para la diversificación de procesos termoquímicos avanzados que permitan el uso eficiente de ellas de manera localizada o en el sector industrial como alternativa a la sustitución parcial de los combustibles fósiles y la adaptación de los conceptos de *biorrefinerías* para la obtención de productos de alto valor agregado.

Las nuevas tecnologías para la valoración económica de biomásas están aún en etapa de desarrollo, y no son competitivas con los procesos petroquímicos; sin embargo, el incremento en los precios del crudo, la disminución de las reservas explotables y la polución ambiental inevitablemente estimulan la sustitución de refinerías de petróleo hacia las biorrefinerías. Las biorrefinerías son procesos de *poligeneración*, en los que las materias primas son procesadas para la obtención de electricidad, energía térmica y derivados químicos. Antes de la explotación de

hidrocarburos, las materias primas renovables suplían gran parte de la demanda de derivados químicos y necesidades energéticas. Entre 1920 y 1930, en EE. UU., un movimiento industrial denominado *chemurgy* promovió el uso de la biomasa como fuente de químicos, con la creencia de que “cualquier cosa hecha con hidrocarburos puede ser hecha con carbohidratos”.

Las biomásas de origen lignocelulósico y el carbón no son por sí mismas capaces de resolver el problema energético del mundo, pero pueden ser importantes para la generación de derivados químicos de alto valor agregado, que reemplacen los obtenidos por vías petroquímicas. Se han desarrollado muchos procesos para la explotación de biomasa, mediante transformaciones bioquímicas (fermentación, hidrólisis, digestión...), químicas (transesterificación) y, para el caso de la biomasa y del carbón, termoquímicas (gasificación, combustión, pirolisis, torrefacción, etc.).

Los procesos termoquímicos tienen la ventaja de procesar grandes volúmenes de biomasa en cortos tiempos de reacción (s-min), en contraste con los procesos biológicos (días-semanas); además lo hacen sin mayores procesos de pretratamiento de la biomasa. Dependiendo del tipo de producto que se desee obtener, se adopta un tipo de tecnología. En los procesos de combustión, la biomasa se descompone térmicamente en un reactor (lecho fluidizado, lecho fijo, rotatorio...), operado en atmósfera oxidante, alrededor de los 900 °C, para la generación de gases calientes como principal producto (energía térmica). Estos gases son empleados para la generación de vapor-electricidad, o como fluido de servicio en otros procesos. De manera similar, en los procesos de gasificación, la biomasa es sometida a una atmósfera reductora o con defecto de oxígeno, para la producción de gas de síntesis (mezcla CO/H₂) y energía térmica.

Se ha desarrollado una plataforma basada en el uso del gas de síntesis para la producción de derivados químicos mediante procesos Fischer-Tropsch. Este tipo de tecnologías han sido profundamente estudiadas, y existen plantas en funcionamiento en el ámbito comercial que las utilizan desde hace más de 50 años (SASOL, Sudáfrica). Sin embargo, aún quedan retos pendientes por resolver, especialmente con respecto a la vida útil de los catalizadores, que hace poco rentable la masificación de la tecnología. El gas de síntesis también es alimentado mediante motores de combustión interna para la generación de energía eléctrica.

Una alternativa promisoría que ha venido ganando fuerza es la pirólisis rápida de biomásas. En este proceso, y a diferencia de la gasificación y la combustión, la biomasa se calienta a temperaturas moderadas, entre 400 y 600 °C, para la obtención de biocarbón (producto sólido), bioaceite (mezcla de compuestos orgánicos) y gases no condensables (CO / CO_2 / H_2 e hidrocarburos), lo cual brinda un enorme potencial para la *poligeneración* de productos derivados de las biomásas. La distribución final de los productos recuperados se logra dependiendo de las condiciones de operación de los reactores y del tipo de biomásas. Normalmente, se recupera entre 60 y 80 % p/p de bioaceite, 20 y 30 % p/p de biocarbón y 15 y 20 % de gases no condensables, en un reactor operado en lecho fluidizado a 500 °C.

El denominado bioaceite es una mezcla de miles de compuestos; entre ellos se destacan los oligómeros de lignina y celulosa, que poseen alto valor comercial, como plastificantes y aditivos farmacéuticos. Esto evidencia que existe un potencial para obtener químicos de alto valor agregado. La producción de levoglucosano y furfural, como derivados de alto valor agregado, ha sido investigada por décadas, pero no mediante procesos de

conversión termoquímica. Aunque se han reportado rendimientos de hasta un 20 % de estos compuestos en el bioaceite, su separación es difícil y se requiere investigación.

Otro concepto de biorrefinerías a partir de biomásas es el desarrollado en las industrias papeleras, donde la fracción de lignina extraída con soda cáustica es un producto abundante; la mayor parte de estas corrientes de lignina quemadas son utilizadas para generar energía o calor, una aplicación con un valor agregado muy limitado. Recientemente, la lignina ha ganado interés como precursora de compuestos químicos, ya que la oferta de materias primas fósiles se está volviendo cada vez más costosa. La pirólisis de lignina se ha estudiado durante casi 100 años, con el propósito científico de entender la compleja estructura del biopolímero aromático y su efecto en la producción de monómeros de fenoles.

Los conceptos de biorrefinerías para *poligeneración* abarcan una multitud de posibilidades para convertir la biomasa en productos, bien sea biológicos o termoquímicos. Los conceptos de biorrefinerías pueden clasificarse según *plataformas, productos, materias primas y procesos*.

Las plataformas pueden definirse con base en los siguientes criterios: (1) intermediarios de materias primas hacia las biorrefinerías: productos finales, azúcares y derivados de lignina; (2) enlaces entre diferentes conceptos de biorrefinerías y (3) productos finales de una biorrefinería. Los intermedios de la biomasa pueden ser sustancias, tales como el gas de síntesis, el biogás, las azúcares, la lignina y el aceite de pirólisis. Estos intermedios son bloques de construcción para los productos finales de las biorrefinerías, que incluyen combustibles, productos químicos y materiales. En la figura 10 se presenta una descripción detallada de las muchas combinaciones posibles para los conceptos de las biorrefinerías para poligeneración.

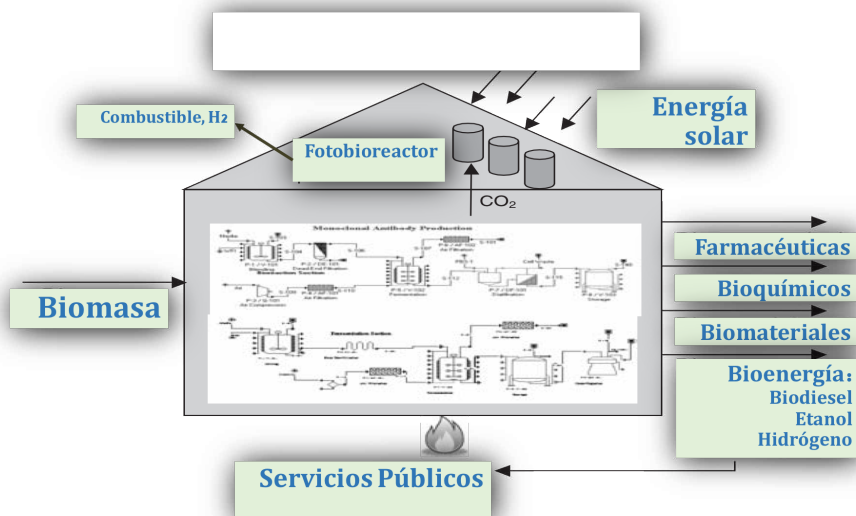


Figura 10. Esquema general de sistemas de biorrefinerías para poligeneración.
Fuente: (Caye et al., 2008)

En una biorrefinería de poligeneración termoquímica, la biomasa se convierte en productos portadores de energía, tales como combustible de transporte (por ejemplo, etanol), energía o químicos. Sin embargo, en términos de valor agregado, los productos químicos pueden aportar una contribución significativa a la rentabilidad global de la refinería.

El estatus actual del concepto de biorrefinerías para poligeneración a partir de biomasa de origen lignocelulósico se encuentra en etapa de investigación y desarrollo de prototipos piloto para la mayoría de procesos termoquímicos, y está en etapa de comercialización mediante rutas termoquímicas. En la figura 11 se presenta un mapeo general de la madurez de la tecnología empleada para la obtención de productos y energía mediante poligeneración.

A pesar de que aún muchas de las tecnologías de poligeneración a partir de biomasas están en etapa de investigación y demostración, son muchos los proyectos que en los últimos años las han venido implementando, enfocadas especialmente en la obtención de productos de valor agregado. Concretamente, el consorcio Empyro en Holanda (www.btg-btl.com) ha desarrollado una planta en el ámbito comercial con tecnología BTG para la obtención de combustibles y derivados químicos a partir de pirólisis rápida de biomasas. Otro ejemplo de uso de pirólisis es el proceso Bioliq® (http://www.bioliq.de/downloads/Flyer_EN.pdf), desarrollado en el Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT), con el objetivo de producir combustibles sintéticos como el diésel Fischer-Tropsch y los productos químicos de la biomasa. Las síntesis basadas en gas de síntesis requieren presiones de hasta 10 MPa. La gasificación *updraft* a alta presión proporciona un gas de síntesis sin alquitrán de alta calidad con bajos contenidos de metano.

Según el reporte REF 210610 del Foro Económico Mundial, se esperan inversiones de alrededor de 36 billones de dólares solo en EE. UU. hasta 2022, para la implementación de nuevas tecnologías de sustitución parcial de los combustibles fósiles. En esa misma línea está China, que tiene contemplado sustituir el 20 % de sus importaciones de petróleo en 2020; para ello ha destinado 1,7 billones de dólares para el desarrollo de tecnologías derivadas de biomasas de origen lignocelulósico. Las tendencias en el ámbito mundial, a pesar de la inmadurez en las tecnologías, es seguir con las investigaciones para el desarrollo de nuevos productos y nuevos procesos que le den viabilidad a la tecnología.

Reflexiones finales

A manera de apuntes o reflexiones, a continuación, se plantean los requerimientos para un futuro seguro, confiable y equitativo en Colombia:

- Dinamizar la economía nacional mediante la creación de empresas dedicadas al aprovechamiento de residuos agroindustriales y de carbón en la generación de nuevos productos para la industria farmacéutica, alimenticia, entre otras, utilizando soluciones energéticas que respeten el ambiente.
- Desarrollar la capacidad técnica y comercial para potenciar e impulsar el uso de las fuentes alternas de energía y generar soluciones eficaces y limpias para el sector transporte.
- Incrementar la competitividad en las empresas por medio de la eficiencia energética. En este sentido, se debe desarrollar lo relacionado con tres aspectos fundamentales de la eficiencia energética del país:
 - Aprovechamiento o recuperación de la energía que se pierde en los procesos industriales.
 - Implementación de tecnologías y sistemas de generación de energías alternativos y avanzados para un óptimo suministro de energía tanto térmica como eléctrica.
 - Evitar pérdidas de energía en los equipos donde se realizan procesos físicoquímicos. Para evitar pérdidas de energía térmica, se puede acudir al desarrollo de nuevos materiales aislantes; para evitar pérdidas de energía eléctrica, utilizar buenos

conductores; integración de corrientes fría con las clientes en procesos industriales, etc.

- Desarrollar tecnología de alto nivel: ingeniería dura con nivel de TRL > 5
- Desarrollar ingeniería blanda basada en la modelación matemática avanzada y en la implementación de sistemas de gestión, monitoreo y control de procesos industriales.
- Desarrollar ciencia básica para comprender fenómenos y generar nuevos procesos eficientes.
- Formar nuevos investigadores con alto nivel para generar nuevos procesos, entender la complejidad del tesoro escondido en nuestros recursos para aprovecharlos y mitigar los efectos de un sistema energético vulnerable y frágil.
- Orientar a las universidades hacia la investigación y a que establezcan fuertes lazos de cooperación con centros regionales de investigación profunda, capaces de albergar nuevos doctores y científicos de alto nivel.
- Crear infraestructura de nivel básico, con laboratorios adecuados y equipos de última generación, conectados en red para el servicio de un conjunto considerable de grupos de investigación.
- Establecer mecanismos legislativos para incentivar el desarrollo de industria de base tecnológica, que sea capaz de absorber el capital humano de alta formación, con miras a producir procesos y tecnologías adecuados

para los nuevos requerimientos del país (conversión de materia prima en productos de alto valor; desarrollo de equipos y maquinaria de manera local y tropicalizada; empresas de servicios que faciliten el desarrollo de nuevos productos y servicios alrededor; institutos o empresas con capacidad para certificar procesos y tecnologías con estándares internacionales, de manera que se facilite el acceso a los productos y servicios ofrecidos en los mercados internacionales).

- Fomentar en los actores una actitud que permita cambiar la manera en que desarrollan sus proyectos, de modo que se parta de un deseo y se trabaje hasta hacerlo viable.
- Desarrollar proyectos para el diseño de esquemas de biorrefinerías en el país, que permitan obtener múltiples derivados de la biomasa como sustitutos de los productos petroquímicos.
- Desarrollar proyectos IGCC para el aprovechamiento de carbón, y así favorecer la diversificación de la canasta energética del país y el desarrollo de productos químicos.
- Establecer relaciones interinstitucionales a través del trabajo conjunto de los grupos de investigación y los laboratorios asociados, de tal manera que se fortalezca la capacidad analítica para lograr definir detalladamente las características fisicoquímicas de la biomasa. Estudiar a profundidad las principales variables que afectan los rendimientos y la calidad de los productos obtenidos durante los procesos de conversión termoquímica de la biomasa.

El caso de Colombia es particular; este país, debido a la diversidad de climas que posee, tiene un enorme potencial para obtener biomasas de orígenes lignocelulósicos, lo cual constituye una *oportunidad* de explotación de estos recursos. Por otro lado, existen muchas regiones aisladas, donde es difícil la interconexión eléctrica, o donde, por causas mismas de la idiosincrasia de las comunidades, no es posible acceder a la red. En este caso existe también la *necesidad* de hacer un suministro mínimo de energía a estas comunidades, empleando los recursos que poseen localmente y que no han sido aprovechados de manera adecuada. Hay que decir que el país ha hecho poco por el aprovechamiento y la explotación de estos recursos; por distintos motivos, la disposición final sigue siendo la misma que hace 100 años, y, por lo tanto, hace falta:

- Desarrollar sistemas integrados de recursos renovables y no renovables bajo el esquema poligeneración (energía y productos de valor agregado), de manera que se aprovechen residuos agroindustriales y se mejore la sostenibilidad y la confiabilidad del sistema energético nacional.
- Implementar prototipos piloto con sistema de generación híbrida que permita la obtención de energía para suministro local y de productos de valor agregado intermedio que puedan llevarse a otros procesos de refinación/purificación centralizados para aprovechar economías de escala que puedan favorecer los procesos.
- Identificar los usuarios potenciales de las metodologías desarrolladas dentro del sector productivo nacional, de tal forma que se proyecte su implementación mejorando la competitividad de la industria y los sectores agronómicos asociados.

- Analizar soluciones tecnológicas que permitan generar esquemas de generación distribuida, integrando fuentes convencionales y no convencionales de energía, y revisar su impacto en el sistema energético colombiano.

Reconocimientos

Agradezco los invaluable aportes que hicieron a este documento el ingeniero químico y magíster Carlos Mario Ceballos M., el doctor Carlos Gómez y el profesor Carlos A. Londoño de la Universidad Nacional de Colombia.

Referencias

Datos estadísticos

Departamento. Nacional de Planeación, DNP. (2014). Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018.

Ministerio de Educación Nacional. (2016). Tasas de cobertura y concentración de la educación superior en Colombia.

Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME. (2003). Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia.

Sistema de Información Ambiental Minero Energético, Unidad de Planeación Minero Energética y Ministerio de Minas y Energía (2020, 3 de diciembre). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>

U. S. Energy Information Administration. (2017, 14 de septiembre). International Energy Outlook 2017. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)

Eficiencia energética

- Manrique, R., Vásquez, D., Vallejo, G., Chejne, F., Amell, A. A. y Herrera, B. (2018). Analysis of barriers to the implementation of energy efficiency actions in the production of ceramics in Colombia. *Energy*, 143, 575-584.
- Chejne, F. (2016). La energía como motor de desarrollo en empresas competitivas. Aplicación de conceptos en la agroindustria de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 37, 79-86.
- Herrera, B., Amell, A., Chejne, F., Cagua, K., Manrique, R., Henao, W. y Vallejo, G. (2017). Use of Thermal Energy and Analysis of Barriers to The Implementation of Thermal Efficiency Measures in Cement Production: Exploratory Study in Colombia. *Energy*, 140, 1047-1058.
- Farid Chejne Janna, Jader D. Alean Valle, Carlos A. Gómez Gutiérrez, Oscar D. López Gómez, Luis A. Betancur Arboleda, César F. Guerra del Río, Jhon F. Vélez Jaramillo, Gaëlle Muraca, Mónica M. Omaña Yáñez, César A. Isaza Roldán. (2015). Recuperación de energía en procesos industriales. Universidad Nacional de Colombia.

Procesos termoquímicos

- Marrugo, G., Valdés, C. F. y Chejne, F. (2016). Characterization of Colombian Agroindustrial Biomass Residues as Energy Resources. *Energy & Fuels*, 30, 8386-8398.
- Meier, D., Van de Beld, B., Bridgwater, A. V., Elliott, D. C., Oasmaa, A. y Preto, F. (2013). State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 20, 619-641.
- Basu, P. (2010). Biomass Gasification and Pyrolysis. Elsevier Inc.
- Montoya Arbeláez, J. I., Chejne Janna, F. y García-Pérez, M. (2015). Fast pyrolysis of biomass: A review of relevant aspects. Part I: Parametric study. *Dyna*, 82(192), 239-248.
- Venderbosch, R. H. y Prins, W. (2010). Fast pyrolysis technology development. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 4, 178-208.
- Chejne, F., Ocampo, A., Espinel J., Aguirre, J., Mondragón, F. y Arenas, E. (2002). Diseño, montaje y puesta en marcha de un gasificador en lecho fluidizado

para el secado de ladrillos. Colciencias, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

Chejne, F., Mondragón, F., Arenas, E., Londoño, C., De La Cruz, J., Álvarez, H., Gómez, C. A., López, D., Pérez, O., Ruiz, W., Hill, A. y Ruiz, O. (2009). Implementación de la gasificación de carbón en lecho fluidizado para un sistema de cocción de ladrillos en horno túnel. Colciencias, Ladrillera San Cristóbal S. A., Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana.

Caye Drapcho, John Nghiem, Terry Walker. Biofuels Engineering Process Technology, McGraw-Hill Companies, Inc. USA (2008). DOI: 10.1036/0071487492

Basu, P. (2013). Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction practical design and theory. Academic Press.

Slavinskaya, N. A. (2010, octubre). Chemical Kinetic Modeling in Coal Gasification Processes: An Overview. En Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (vol. 43963, pp. 609-618).

Figueiredo, J. A. y Moulijn, J. L. (eds.) (1986). Carbon and Coal Gasification-Science and Technology. Alvor-Portugal, pp. 27-57.

Hill, G. R. (1988). "Coal science," Fuel Processing Technology, vol. 17, no. 3. p. 312.

Miller, B. G. y Tillman, D. A. (2008). Coal Characteristics. En Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems (pp. 33-81). Elsevier Inc.

Ye, R., Xiang, C., Lin, J., Peng, Z., Huang, K., Yan, Z., Cook, N. P., Samuel, E. L. G., Hwang, C.-C., Ruan, G., Ceriotti, G., Raji, A. R. O., Martí, A. A. y Tour, J. M. (2013). Coal as an abundant source of graphene quantum dots. Nat. Commun., 4(2943), 1-7.

Blandón, A., "Libro Guía Caracterización Avanzada de Carbones." Universidad Nacional de Colombia, 2013.

Montoya, J., Pecha, B., Roman, D., Chejne, F. y García-Pérez, M. (2017). Effect of temperature and heating rate on product distribution from the pyrolysis of sugarcane bagasse in a hot plate reactor. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 123, 347-363.

- Stankovikj, F., McDonald, A. G., Helms, G. L. y García-Pérez, M. (2016). Quantification of Bio-Oil Functional Groups and Evidences of the Presence of Pyrolytic Humins. *Energy & Fuels*, 30, 6505-6524.
- Marrugo Escobar, G. P. (2016). Efecto de los cambios estructurales de diferentes biomasas pirolizadas sobre las características del gas de síntesis, obtenido a partir de la gasificación de biochar [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín]. Repositorio Institucional UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56490>
- Chejne, F., Valdés, C., Gómez, C., Londoño, C., Arenas, É., Marrugo, G., Montoya, J., Macías R., De la Cruz J. y Ocampo, A. (2017). La gasificación, alternativa de generación de energía y de productos con alto valor agregado para la industria. *Applied thermal engineering*, 107, 1201-1209.
- Granados, D. A., Ruiz, R. A., Vega, L. Y. y Chejne, F. (2017). Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. *Energy*, 139, 818-827.
- Valdés, C. F., Chejne, F., Marrugo, G. P., Gómez, C. A., Marín-Jaramillo, A. y Norena-Marín, L. (2017). Energy evaluation of pelletized mixtures of IWTP sludge and coal-fired boiler ashes by co-combustion: Identification of synergistic effects. *Applied Thermal Engineering*, 124, 191-201.
- Pecha, M. B., Terrell, E., Montoya, J. I., Stankovikj, F., Broadbelt, L. I., Chejne, F. y García-Pérez, M. Effect of Pressure on Pyrolysis of Milled Wood Lignin and Acid-Washed Hybrid Poplar Wood. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(32), 9079-9089.
- Marrugo, G., Valdés, C. F. y Chejne, F. (2017). Biochar Gasification: An Experimental Study on Colombian Agroindustrial Biomass Residues in a Fluidized Bed. *Energy & Fuels*, 31(9), 9408-9421.
- Valdés, C. F. y Chejne, F. (2017). Effect of reaction atmosphere on the products of slow pyrolysis of coals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126, 105-117.
- Montoya, J., Pecha, B., Chejne, F. y García-Pérez, M. (2017). Methodology for Estimation of Thermal Ejection Droplet Size Distribution and Intensity

during the Pyrolysis of Sugarcane Bagasse and Model Compounds. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 125, 69-82.

Pecha, M. B., Montoya, J. I., Ivory, C., Chejne, F., García-Pérez, M. (2017). Modified pyroprobe captive sample reactor: Characterization of reactor and cellulose pyrolysis at vacuum and atmospheric pressures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(18), 5185-5200.

Granados, D. A., Basu, P. y Chejne, F. (2017). Biomass Torrefaction in a Two-Stage Rotary Reactor: Modeling and Experimental validation. *Energy & Fuels*, 31(5), 5701-5709.

Pecha, M. B., Montoya, J. I., Chejne, F. y García-Pérez, M. (2017). Effect of a Vacuum on the Fast Pyrolysis of Cellulose: Nature of Secondary Reactions in a Liquid Intermediate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(15), 4288-4301.

Montoya, J., Pecha, B., Janna, F. C. y García-Pérez, M. (2017). Single particle model for biomass pyrolysis with bubble formation dynamics inside the liquid intermediate and its contribution to aerosol formation by thermal ejection. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 204-218.

Montoya, J., Pecha, B., Chjene Janna, F. y García-Pérez, M. Identification of the fractions responsible for morphology conservation in lignocellulosic pyrolysis: Visualization studies of sugarcane bagasse and its pseudo-components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 123, 307-318.

Montoya, J., Pecha, B., Roman, D., Chejne Janna, F., García-Pérez, M. Effect of temperature and heating rate on product distribution from the pyrolysis of sugarcane bagasse in a hot plate reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 123, 347-363.

Montoya, J. I., Chejne Janna, F. y García-Pérez, M. (2015). Fast pyrolysis of biomass: A review of relevant aspects. Part I: Parametric study. *Dyna*, 82(192), 239-248.

Valdés, C. F., Marrugo Escobar, G. P., Chejne Janna, F., Montoya J. I. y Gómez, C. A. (2015). Pilot-Scale Fluidized-Bed Co-gasification of Palm Kernel Shell with Sub-Bituminous Coal. *Energy and Fuels*, 29(9), 5894-5901.

Anexo 1

Comentario de Antonio Valero, científico del CIRCE

Pregunta 1. ¿Cuáles son los 3 principales cuellos de botella para adoptar y desarrollar tecnología para la energía en Colombia (regulatorios, política pública, capital humano, financiación, etc.)?

- Capital humano no formado y muchas veces inconsciente de la realidad investigativa para el desarrollo.
- Cortoplacismo y fragmentación del conocimiento en la planeación a largo plazo; como consecuencia se tiene un conocimiento individual y que no se lo integra para buscar el bien común.
- Requerimientos de materiales especiales para desarrollar las energías alternativas. Se requieren tierras raras; en este sentido, China genera el 97 % de las tierras raras que requiere el mundo. Cada vez que se ha incrementado el nivel tecnológico, se ha incrementado el requerimiento del número de elementos (véase la figura A1). Se pasará de la dependencia de combustibles fósiles a la dependencia de los minerales.

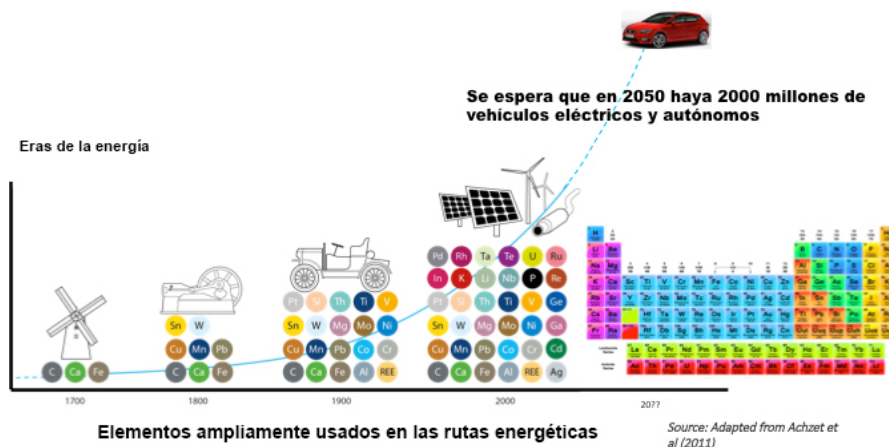


Figura A1. Evolución exponencial del número de elementos requeridos por la penetración de nuevas tecnologías

Fuente: Ortego, A., Valero, A., Valero, A., Calvo, G., Villacampa, M. e Iglesias, M. (2018, 4 de octubre) *Strategic metals ranking in the automobile sector*. 13th SDEWES. .

Pregunta 2. ¿Cuáles son las 5 oportunidades de negocios innovadores en energía en el corto y mediano plazo (8 años)?

- Existen procesos de altas temperaturas dentro del sector industrial que no pueden usar electricidad; se requerirá el uso de la energía térmica generada a partir del carbón, la biomasa y otros recursos de origen fósil. En consecuencia, la eficiencia energética puede lograr disminuir el consumo de energía, el cual participará en más de 70 %. De allí la importancia del incremento de sensores para el control de procesos.
- Se requiere una economía circular, o más bien en espiral, para la recuperación de materiales.
- Desarrollo de una agricultura sostenible.

- Investigación para desmontar y recuperar materias primas, así como para reutilizar y alargar la vida de los equipos.
- Darles valor agregado a las materias primas, tanto de consumo interno como de exportación; esto implica desarrollar estrategias para el aprovechamiento de los recursos en el propio país.

Pregunta 3. ¿Cuáles son las 3 propuestas prácticas para desarrollar una relación de trabajo con las universidades, las regiones, los centros de investigación y los ecosistemas internacionales de innovación en energía?

- Creación de institutos de investigación mixta, unitemática y multidisciplinaria.
- Búsqueda de liderazgo, lo cual está en relación con sentirse en capacidad de generar desarrollos propios de alto nivel.
- Pensar en proyectos grandes y sostenibles.

Pregunta 4. ¿Cuál es el alcance de la innovación corporativa en energía?

- Electrificar todo para aprovechar la energía renovable barata.

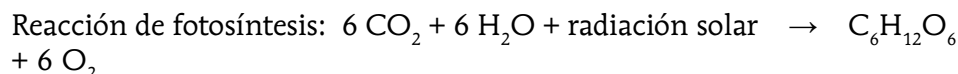
- Aprovechar el almacenamiento de energía mediante el bombeo de agua de un piso inferior a otro superior, para luego generar energía hídrica.
- Eliminar gradualmente los combustibles fósiles para 2050.
- Hacer que la agricultura sea sostenible.
- Evitar la dependencia de las materias primas críticas.
- Ecologizar las economías digitales.
- Brindar educación, información y conocimiento para todos.
- Proteger la naturaleza.
- Preservar la cultura local.

Pregunta 5. ¿Se puede integrar la energía a la solución de problemas transversales (por ejemplo, desarrollo urbano, agricultura, etc.)?

La energía es transversal, y mediante su disponibilidad se fomenta el desarrollo y se garantiza la equidad social.

Energía química sostenible para los retos del país

Entre los recursos más importantes para la supervivencia de la humanidad se encuentran los alimentos, el agua y la energía, los cuales interactúan entre sí y dependen del Sol como la fuente externa de energía para el sostenimiento de la vida en la Tierra. La radiación solar causa la lluvia, los vientos y la fotosíntesis:



Esta última, a su vez, es el mecanismo mediante el cual las plantas generan glucosa y oxígeno, almacenando así la energía solar en forma de energía química en todos sus derivados como azúcares, almidones, celulosa, grasas y aceite. Estos componentes pasan de las plantas a los animales, y en conjunto, producen o hacen parte de lo que se conoce como la biomasa.

Al realizar la reacción de combustión, que es la reacción inversa a la de fotosíntesis, se libera CO_2 y la energía química almacenada. En consecuencia, se puede clasificar la energía aprovechable del Sol como energía física, de la cual forman parte la energía eólica, la energía solar, la energía hidráulica y la energía química o la de la biomasa almacenada durante el proceso de fotosíntesis.

El almacenamiento de la energía química en la biomasa generada durante los diferentes periodos geológicos a lo largo de varios millones de años ha dado lugar a la formación de combustibles fósiles (carbón, bitúmenes, petróleo y gas natural). En la generación de energía, las biomásas forestal, agrícola, pecuaria y residual se conocen como biocombustibles.

Procesos de aprovechamiento

Para aprovechar los recursos fósiles, generalmente se utilizan procesos de transformación y adecuación previa, tales como combustión, gasificación y pirólisis, ayudados con procesos de separación y purificación de los productos; estos mismos procesos también se utilizan con la biomasa actual. Los recursos fósiles son finitos y son el producto de la acumulación del CO_2 que tomaron de la atmósfera existente cuando se formaron, para generar el oxígeno que dio origen a la vida animal. Durante el aprovechamiento de estos combustibles como energía térmica obtenida por combustión se libera al ambiente el CO_2 almacenado, el cual incrementa su concentración en la atmósfera actual y, como consecuencia, se produce el fenómeno conocido como *efecto invernadero*. Este efecto incrementa la temperatura ambiente y produce el *calentamiento global* (Rincón Martínez *et al.*, 2018). La biomasa actual también genera el CO_2 que ha sido almacenado durante su cultivo, pero no afecta su contenido, ya que la toma y la emisión se realizan en el mismo tiempo geológico; esto significa que, gracias a su inmediato aprovechamiento, no hay efectos en la concentración de CO_2 en la atmósfera, por lo que la biomasa se considera fuente de energía renovable, tal como la energía solar o la energía eólica. Por ser una energía almacenada durante corto tiempo, de meses o años, es energía libre, un complemento de la energía física, dado que puede ser utilizada cuando se necesite (Rincón Martínez *et al.*, 2018).

El problema

En la actualidad, la humanidad ha utilizado menos de la mitad de los recursos fósiles almacenados durante millones de años en la generación de energía eléctrica, para el transporte aéreo y terrestre, para la cocción de alimentos y para suplir las necesidades de la industria. Esto ha causado el incremento del CO₂ en la atmósfera de 310 ppm a 415 ppm (*Europa Press*, 2019), y ha ocasionado el efecto invernadero que se manifiesta en el calentamiento global, problema que hoy en día afecta a la humanidad. De hecho, la sobrevivencia humana puede verse amenazada si se permite que el calentamiento continúe incrementando al ritmo actual.

La solución

Si el problema es el incremento de los gases de efecto invernadero causados por el uso de los combustibles fósiles, la solución es evitar el uso de estos combustibles en el futuro. Para ello hay que reducir el uso del carbón en las centrales térmicas y de los combustibles de petróleo y gas natural en el transporte y otros usos industriales, disminuir la utilización de los recursos fósiles e incrementar el uso de las energías renovables, como la energía solar, la energía eólica y la energía química o bioenergía. Existen acuerdos internacionales que buscan cumplir con estos objetivos, de los cuales el más conocido es el de París de 2015, suscrito por 195 países miembros, dentro de ellos Colombia (Del y Clim, 2017).

El reto de Colombia

Aunque en el contexto global las emisiones generadas por el país son despreciables, Colombia económicamente depende de las exportaciones de combustibles fósiles, por lo cual está en la obligación de contribuir a la mitigación de estas emisiones y aprovechar su localización en la zona

tropical, que es la de máxima producción de biomasa, para promover el uso de energías renovables. Esta circunstancia es una posibilidad para el desarrollo industrial, energético y económico del país. Según la información presentada por el Ministerio de Minas y Energía, las reservas probadas de petróleo y gas alcanzarán para un periodo de entre 6 y 10 años, respectivamente (*El Tiempo*, 2019). Esta información que desde el punto de vista del fenómeno del cambio climático es muy buena, no lo es desde el punto de vista de la economía, siguiendo el modelo de BAU (*business as usual*).

En el primer caso, la opción política es la de obtener el suministro energético a partir de energía renovable, especialmente de la energía química, proveniente de la biomasa actual. Para esto el Gobierno debe establecer un programa de transición energética en el que se incluya la formación de grupos de investigación y desarrollo de nivel básico y de transferencia de tecnología de nivel industrial, con el fin de instalar plantas comerciales de transformación de la biomasa en combustibles de primera y segunda generación, por medio de gasificación y síntesis Fischer-Tropsch, que buscan obtener gasolina y diésel sintético. Desde la perspectiva de la biotecnología, es importante la producción de biometano a partir de biogás, como sustituto de gas natural, utilizando residuos y cultivos energéticos, tal como lo han realizado los países europeos liderados por Alemania. Colombia posee suficiente espacio para cumplir con esta propuesta sin afectar la seguridad alimentaria (Gauch, 2012). Cumpliendo con este programa energético del país, y dado que es probable que el futuro del transporte sea eléctrico (Rincón *et al.*, 2019), se puede establecer de manera paralela un programa de generación eléctrica que utilice represas y pequeñas centrales hidroeléctricas. En el caso de las centrales hidroeléctricas, prácticamente todos los ríos de la cordillera Oriental cuando salen al llano tienen una garganta que permitiría la construcción de represas y la instalación aguas abajo de sistemas de riego agrícola para la producción de alimentos durante todo el año.

En cuanto a la producción del biometano, el sustituto del gas natural, este se puede obtener a partir de biomasa biodegradable proveniente de residuos agrícolas, agropecuarios urbanos y cultivos energéticos, como los de caña y palma que se cultivan actualmente. En Europa es rentable la producción de biometano a partir de cultivos de maíz ensilado para aumentar la degradabilidad. La producción del biometano como sustituto del gas natural desarrolla una nueva industria para el campo. En Colombia hay suficiente tierra en donde se pueden establecer cultivos energéticos (caña de azúcar, palma, maíz y pastos) para sustituir el gas natural. Por su parte, este último se importaría, sin afectar el uso de la tierra o la seguridad alimentaria; además, quedaría abierta la posibilidad de que, en 10 años, se pudiera establecer esta industria de manera competitiva, con los costos internacionales de importación del gas natural que esto implica (Thofern, 2011). Esta iniciativa tiene la ventaja de crear empresas agrícolas con mercados y medios de transporte y distribución ya establecidos. En el desarrollo industrial, tanto urbano como rural, se deben establecer sistemas híbridos para el aprovechamiento de la energía, de tal manera que por la noche se genere electricidad con biogás o gas de síntesis proveniente de la biomasa leñosa.

En el segundo caso, se sabe con cierta seguridad que las reservas probables de los combustibles fósiles son mayores que las informadas, por lo cual se ha propuesto el desarrollo del sistema de fracturación de las rocas (*fracking*), en especial de las rocas madres de la cordillera Oriental. Sin embargo, el problema de esta tecnología es el impacto ambiental que pueda causar y la aceptación por parte de la comunidad, tanto en Colombia como en el resto del mundo. Para hacer esto es muy importante la evaluación de la contaminación por metales pesados de las aguas que van a ser utilizadas en la fertilización agrícola, la alimentación, entre otros usos.

En cuanto a las emisiones de CO_2 , producto de la generación eléctrica con carbón, las vías que se están investigando son las de almacenamiento de este gas en sitios profundos del mar y en los espacios dejados por la extracción de petróleo y gas natural; también se ha iniciado su utilización en los cultivos bajo invernadero para aumentar su crecimiento, así como en biocombustibles, aprovechando que en los sistemas de producción de biogás, en la etapa metanogénica, los microorganismos toman el CO_2 producido y lo someten a reacción con el hidrógeno producto de esta etapa, para formar el biometano. El metano también se puede obtener generando una reacción entre el dióxido de carbono producto de la combustión y el hidrógeno obtenido por electrólisis con energías renovables (García Lapeña, 2013). Estas soluciones, junto con la oxidación de carbón para obtener dióxido de carbono puro, podrían implementarse en el futuro.

Otro reto que tiene el país es el de aprender a almacenar la energía, de modo que se la pueda utilizar posteriormente, en especial durante la época del fenómeno del niño. Para ello se contempla el almacenamiento de biomasa, el acopio de agua en represas y la utilización de la energía eólica y la energía solar, dado que en esta época es cuando más radiación solar y velocidad del viento se tiene. El país debe trabajar en estos temas de almacenamiento, en especial, en las baterías de grafeno, grafeno-litio y flujo redox. Estas tecnologías son emergentes, pero su uso comercial favorecerá el sistema de transporte eléctrico y el almacenamiento de grandes cantidades de energía, con lo cual se evitarán las medidas de racionamiento, mediante la ayuda de programas inteligentes que regulen el almacenamiento y el consumo de la energía.

Desarrollo

Finalmente, el desarrollo de las ideas comentadas anteriormente exige tener personal formado en diferentes disciplinas, tanto básicas como aplicadas, y en diferentes niveles. En la parte básica, se necesita tener la colaboración de físicos, químicos y biólogos, mientras que, en la aplicada, pensando en la necesidad de realizar procesos de transferencia y escalado de tamaño a plantas pilotos, demostrativas y comerciales, es necesario contar con la colaboración de ingenieros eléctricos, ingenieros químicos, ingenieros electrónicos, ingenieros mecánicos, economistas y demás personal de apoyo. El desarrollo de la bio-energía genera trabajo en el campo y en los centros de investigación que se crean para esta misión; así mismo permite el progreso industrial y el establecimiento de procesos de producción en el campo, lo cual evita la transformación energética en la ciudad y ayuda a descontaminar los centros industriales del país.

En la preparación de esta propuesta el aspecto económico no es el factor determinante para su realización, dado que, por tratarse de un proyecto cuyo fin es la disminución de gases de efecto invernadero, se contará con la colaboración internacional y el aporte de los diferentes ministerios participantes, en especial el de Minas y Energía. De igual manera, debido a su carácter interdisciplinario y a su desarrollo gradual, desde los ensayos de laboratorio hasta el diseño y la construcción de plantas industriales, esta propuesta exige la intervención y el trabajo coordinado de las diferentes entidades del Estado. En este sentido, es importante que sea liderada por el nuevo Minciencias, ya que aquella responde perfectamente a uno de los objetivos de este ministerio:

Promover el conocimiento científico y tecnológico, contribuir al desarrollo y crecimiento del país y se anticipe a los retos tecnológicos futuros, siempre buscando el bienestar de los colombianos y consolidar una economía más productiva y competitiva y una sociedad más equitativa (Congreso de Colombia, 2019).

Además, por su alcance, es necesario trabajar coordinadamente con otros ministerios, como los de Minas y Energía, de Agricultura, de Industria Comercio y Turismo, de Medioambiente y Desarrollo Sostenible y de Vivienda, Ciudad y Territorio.

En el Acuerdo de París, Colombia se comprometió a reducir sus emisiones en un 20 %, con respecto a las proyecciones para el año 2030. El Ministerio de Minas y Energía, con base en estos compromisos en la Comisión Intersectorial de Cambio Climático (CICC), avanzó en las metas de contribución nacionalmente determinadas (NDC), a fin de diversificar la matriz energética colombiana, promover proyectos a partir de fuentes no convencionales de energía renovable y avanzar en la autogeneración de energía mediante fuentes alternativas con un potencial de reducción de emisiones en 2030 de 4,74 Mton CO₂-eq sobre la meta nacional del 20 %. Por este motivo, ese ministerio debe liderar, en coordinación con los otros ministerios, la etapa de implementación de plantas comerciales que, según estudios previos, han demostrado la viabilidad técnica y comercial para ser transformadas en plantas industriales.

Como se puede observar, el uso y el aprovechamiento de la energía nos compete a todos, pues es un recurso vital para lograr el desarrollo del país con equidad.

Referencias

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Departamento Nacional de Planeación. (2017). *Medios de implementación de la CMNUCC en Colombia. Finanzas públicas del cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023736/FINANCIAMIENTO_CLIMATICO.pdf
- Congreso de Colombia. (2019, 24 de enero). Ley 1951. *Por la cual se crea el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación y se dictan otras disposiciones*. [http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY 1951 DEL 24 DE ENERO DE 2019.pdf](http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY_1951_DEL_24_DE_ENERO_DE_2019.pdf)
- El Tiempo. (2019, 13 de mayo). Reservas de petróleo de Colombia: suben en crudo pero bajan en gas. *El Tiempo*. Consultado el 6 de junio de 2019. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/reservas-de-petroleo-de-colombia-suben-en-crudo-pero-bajan-en-gas-361244>
- García Lapeña, B. (2013). *Producción biológica de metano a partir de H₂ y CO₂* [tesis de maestría, Universidad de Valladolid]. Respositorio Documental UVA. <http://uvadoc.uva.es:80/handle/10324/4950>
- Gauch, M. (2012). *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. Energía sostenible para Colombia*. <https://www.fedebiocombustibles.com/files/EvaluacionDelCicloDeVidaDeLaCadenaDeProduccionDeBiocombustiblesEnColombia-MarcelGauch.pdf>
- Europa Press (2019, 14 de mayo). La concentración de CO₂ en la atmósfera alcanza un récord de 415 ppm, por primera vez desde hace 3 millones de años. *Europa Press*. <https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-concentracion-co2-atmosfera-alcanza-record-415-ppm-primera-vez-hace-millones-anos-20190514130935.html>
- Cortez, L., Leal, M. y Horta Nogueira, L. (eds.). (2019). *Sugarcane bioenergy for sustainable development : expanding production in Latin America and Africa*. Routledge.
- Rincón Martínez, J. M., Durán Hernández, D. M., Quintero Montoya, O., Duarte González, C. S., Guevara Patiño, P. O. y Velásquez Lozano, M. E. (2018). Revista CIDET. 16-25. <http://revista.cidet.org.co/>
- Thofern, H. (2011). *Bioenergía y seguridad alimentaria*. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 37(2), 122-127. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86421189004.pdf>

La energía nuclear en Colombia, una oportunidad sin explotar

La energía nuclear es una de las fuentes energéticas más prometedoras para el desarrollo del futuro de la humanidad. Se divide en dos clases, fusión y fisión nuclear. La primera es la más desafiante, en términos de tecnología, y aún se encuentra lejos de una implementación industrial. La fisión, por otro lado, es el método estándar utilizado alrededor del mundo en las plantas de energía nuclear; implica una inversión inicial costosa, que la pone en desventaja con respecto a otros métodos de generación energética, pero garantiza una fuente de energía continua y estable, durante el periodo de funcionamiento del reactor, que es aproximadamente de 40-60 años.

En Colombia, el campo de la energía nuclear está poco desarrollado; el único reactor nuclear del país es de propiedad del Servicio Geológico Colombiano, que es utilizado principalmente para investigación. Además, actualmente hay muy pocos grupos dedicados a la investigación en esa área. Por otra parte, existen reservas de uranio en las cordilleras, pero tienen una baja concentración, lo cual hace poco atractiva su explotación comercial.

Fisión nuclear

La *fisión* nuclear representa una alternativa para la generación de energía viable en el marco actual del cambio climático, pues por la misma cantidad de energía generada, solo produce una fracción muy pequeña del CO₂, el

cual sería liberado por métodos convencionales. Esto queda ilustrado en la siguiente tabla, donde se compara el CO₂ generado por plantas nucleares para obtener 2417 TWh de energía con medios tradicionales (World Nuclear Association, 2020). Su principal inconveniente es la producción de desechos radiactivos de larga vida media que son difíciles de almacenar.

Comparación de emisiones de carbono con respecto a la energía producida para energía nuclear, gas y carbón
Fuente: tomado de World Nuclear Association (2018).

	Emisiones estimadas para producir 2417 [TWh] de energía (Millones de toneladas de CO2)	Emisiones potencialmente evitadas gracias a la energía nuclear (Millones de toneladas de CO2)	Emisiones potencialmente evitadas gracias a la energía nuclear (Equivalente en millones de autos)
Energía Nuclea	29	NA	NA
Gas (CCS)	1184	1155	C.250
Carbón	1981	1952	C. 400

Históricamente, la energía nuclear ha representado una oportunidad para amortiguar la impredecibilidad del mercado energético internacional, disminuyendo la dependencia energética de un país; ejemplos de esto se encuentran en países como Japón (World Nuclear Association, 2020; EIA, 2017) o Francia (Quentin, 2017), donde históricamente la alternativa nuclear ha hecho parte importante del consumo energético de cada país y será fuertemente implementada en los planes para un futuro libre de emisiones de carbono.

Los reactores de fisión nuclear actuales han sido diseñados con altos estándares de calidad para evitar cualquier eventualidad. Así mismo, se han tomado medidas con el fin disminuir considerablemente el impacto de agentes externos (como terremotos) para prevenir accidentes, como el sucedido en Fukushima, Japón, donde un terremoto afectó uno de los reactores de la planta.

La radiación proveniente de desechos nucleares tiene un rango de peligro que disminuye a medida que aumenta la distancia que se toma de ellos. Actualmente existen varios métodos que han demostrado ser altamente exitosos y que garantizan la contención segura de este tipo de desechos

(IAEA, 2018); además, se cuenta con la opción de reciclar el combustible nuclear, lo cual disminuye drásticamente la cantidad de desechos radiactivos producidos en una planta.

En el ámbito mundial, los países industrializados han tomado posiciones muy diversas en este campo. Alemania, por ejemplo, ha tomado la decisión de eliminar completamente los reactores nucleares, mientras que Francia o China continúan utilizándolos ampliamente.

Fusión nuclear

La fusión nuclear podría ser la solución al problema energético no solo del país, sino de toda la humanidad, pues tiene todas las ventajas de la fisión nuclear, pero es estable, segura, confiable y no produce desechos radiactivos relevantes. El ITER es el reactor de fusión más grande del mundo, y comenzó pruebas en 2020; si este proyecto es exitoso, la fusión nuclear llegaría al mercado en aproximadamente 30 o 40 años (IAEA 2018).

¿Por qué se necesitaría una política sobre energía nuclear en Colombia?

Colombia está pasando por un momento histórico, la demanda energética aumenta cada año y la posible amenaza de racionamiento energético en el futuro, producto de contratiempos en megaproyectos como Hidroituango, ha demostrado la necesidad de diversificar las fuentes de energía en el país. La energía nuclear podría ser una manera moderna, eficiente, confiable y limpia de lograr esta meta.

La investigación en energía nuclear en Colombia es reducida. Sin embargo, existen siete grupos de investigación dedicados a otros aspectos de la física nuclear y de altas energías, de los cuales se destacan el grupo FINUAS de la UPTC, el grupo GFNUN de la Universidad Nacional y el grupo Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano; este último cuenta con

un pequeño reactor nuclear llamado IAN-R1, legado del Instituto de Asuntos Nucleares. Además de esto, existen varios grupos dedicados a la investigación y la simulación de fluidos, tema de vital importancia para el desarrollo de la fusión nuclear, entre ellos se destaca el grupo IFCRA de la Universidad de Cartagena y el Fisquim de Cali.

Se crea entonces la oportunidad de fortalecer la investigación en energía nuclear en el país, desarrollando una política que incentive la creación de nuevos grupos y que utilice la experiencia y las capacidades de los grupos ya presentes en el país, como, por ejemplo, la utilización del IAN-R1 para el entrenamiento de personal en el manejo de reactores nucleares.

Conclusiones

Es importante mantenerse informados acerca de los desarrollos recientes, tanto en fisión como en fusión nuclear, pues constituyen una opción que no se puede descartar ante una situación de emergencia.

Por lo anterior, se debe fomentar la creación de políticas que estimulen la investigación en este sector, apoyándose en los grupos que investigan sobre este tema en el país, y haciendo un especial seguimiento del desarrollo y la implementación de la fusión nuclear. Lo anterior es necesario para fijar las bases de un programa nuclear en Colombia si la nación llegara a necesitarlo.

Ahora bien, aunque la energía nuclear tiene el potencial de ayudar a evitar una posible crisis energética en el futuro del país, la decisión de iniciar un programa nuclear en Colombia no debe ser tomada a la ligera, sino que se la estudiar seriamente. La nación debe tomar una postura clara al respecto.

En el caso de que Colombia decida, de manera consciente e informada, iniciar un programa nuclear, puede apoyarse en entidades internacionales como la International Atomic Energy Agency (IAEA), de la cual Colombia es miembro, para mitigar la falta de experiencia en este sector.

Referencias

- World Nuclear Association. (2020). *Radioactive Waste Management*. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>
- Perrier, Q. (2017). *The french nuclear bet*. <https://ideas.repec.org/p/fae/ppaper/2017.01.html>
- World Nuclear Association. (2020). *Nuclear power in Japan*. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>
- U. S. Energy Information Administration. (2017). *Country Analysis Brief: Japan*. https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/countries_long/Japan/japan.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2007). *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power*. <https://www.iaea.org/publications/7812/milestones-in-the-development-of-a-national-infrastructure-for-nuclear-power>
- International Atomic Energy Agency. (2019). *Responsibilities and functions of a nuclear energy programme implementing organization*. <https://www.iaea.org/publications/12327/responsibilities-and-functions-of-a-nuclear-energy-programme-implementing-organization>
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Status and trends in spent fuel and radioactive waste management*. <https://www.iaea.org/publications/11173/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management>
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Fusion*. <https://www.iaea.org/topics/fusion>

Hidroelectricidad

La demanda de energía mundial ha crecido de manera exponencial; así mismo, se ha registrado un incremento proporcional del impacto medioambiental causado por este crecimiento en la demanda energética. Esto evidencia que se requiere ampliar las fuentes de abastecimiento energético, e incluir energías más limpias. Es por esto que los gobiernos reconocen cada vez más que las energías sostenibles desempeñan un papel vital en las estrategias para proporcionar soluciones a algunos de los objetivos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas en 2015, como los objetivos de lograr energía limpia y asequible, gestión del agua dulce, lucha contra el cambio climático y mejora de los medios de vida.

Del mismo modo, en la última década del siglo XXI, la oferta de CTel ha impulsado la investigación, el estudio y el desarrollo de propuestas tecnológicas para la obtención de nuevas y mejores formas de generación energética. Lo anterior con el propósito de que los sistemas tradicionales permanezcan en el tiempo, a cambio de que generen un mínimo impacto ambiental y bajos costos, de tal manera que satisfagan la demanda energética a partir del avance industrial y el desarrollo económico.

Dentro de todas las tecnologías de energía renovable, la hidroeléctrica es una tecnología madura, confiable, de bajo costo y que continúa teniendo la mayor capacidad instalada (IRENA, 2019). Esta fuente trae beneficios: genera bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la operación para generarla es flexible y más económica que en el caso de las termoeléctricas. En el mercado energético latinoamericano, Colombia se encuentra a la vanguardia de este tipo de energías, y por este motivo, en 2018, ocupó el tercer lugar en capacidad hidroeléctrica instalada,

con 11,837 MW, que representan cerca del 70 % de la energía eléctrica generada en el país (IHA, 2019). De acuerdo con cifras de la firma XM, operadora del SIN y administradora del Mercado de Energía Mayorista de Colombia, para generar dicha energía se encuentran en funcionamiento 28 plantas hidroeléctricas despachadas centralmente (capacidad neta: 10.974 MW) y 115 no despachadas centralmente (capacidad neta: 860,57 MW) (Montes, 2019). Además, existen 125 proyectos hidroeléctricos en la etapa de prefactibilidad, según la Unidad de Planificación Minero Energética (UPME), que agregarían aproximadamente 5.600 MW a los ya instalados (IHA, 2018).

El actual potencial hidroeléctrico con el que cuenta el país se debe a su topografía, pluviosidad y recurso hídrico, factores que permiten que las hidroeléctricas sean consideradas como fuentes de desarrollo económico y social. Sin embargo, el país conoce la dependencia que supone el recurso hídrico ante los cambios climáticos, así como el alto impacto social y ambiental cuando se desarrollan grandes proyectos de construcción de represas, como los casos de Hidroituango y del Quimbo, cuyos proyectos han generado gran controversia por las afectaciones a lo largo de su ejecución.

Impacto ambiental y social

La energía obtenida desde las hidroeléctricas es una de las energías más limpias, ya que no es generada por derivados del petróleo; sin embargo, la construcción de los embalses produce una serie de impactos ambientales negativos. Un estudio realizado por investigadores de la Universidad McGill, World Wildlife Fund (WWF), y otras instituciones destaca que las represas, embalses y diques son los principales contribuyentes a la pérdida de conectividad de los ríos, y recalca que solo un tercio (37 %) de los ríos más largos del mundo siguen fluyendo libres (Grill *et al.*, 2019). La pérdida de conectividad de los ríos es un asunto preocupante, porque estos son de vital importancia para el intercambio de agua, nutrientes, sedimentos y especies con deltas, estuarios y el océano; la interrupción

de la conectividad a menudo disminuye o incluso elimina estos servicios ecosistémicos fundamentales. De igual forma, la protección de los ríos que fluyen libres también es clave para salvar la biodiversidad de los sistemas de agua dulce. Un reciente análisis de 16.704 poblaciones de vida silvestre en el ámbito mundial demostró que las poblaciones de especies de agua dulce experimentaron la mayor disminución de entre todos los vertebrados en los últimos 50 años, con una reducción en promedio de 83 % desde 1970 (*Semana Sostenible*, 2019).

De igual forma, la construcción de hidroeléctricas genera un efecto de barrera que impide la migración de los peces y provoca la ausencia de sedimentos aguas abajo, de modo que se fragmentan los ecosistemas y se aumenta el riesgo de extinción de las especies. A esta conclusión han llegado investigadores colombianos, estadounidenses y holandeses, al realizar un estudio en toda la cuenca del río Magdalena. Así mismo, añaden que los proyectos hidroeléctricos tendrán que estar sustentados en un enfoque integral; en otras palabras, señalan que estos proyectos no deben limitarse a analizar el ecosistema puntual donde se planea ubicar el proyecto, sino que deben tener en cuenta los efectos que su construcción puede acarrear en toda la cuenca (Angarita *et al.*, 2018).

En cuanto al impacto social, la energía hidroeléctrica tiene el potencial de acelerar el progreso social y económico y reducir la pobreza, mediante la ampliación del acceso a la electricidad. Sin embargo, en ocasiones las comunidades quedan expuestas al desplazamiento y a la modificación de los estilos de vida. Este es el caso del municipio de Tierralta (Córdoba), donde se construyó la represa Urrea I, en la que hubo más de 34.000 personas desplazadas y más de 30.000 hectáreas abandonadas, según cifras del Gobierno nacional (Villamizar, 2018).

Normativa del sector eléctrico

Las Leyes 142 y 143 de 1994 y la Ley 1715 de 2014, que rigen el sector eléctrico en el país, explican la madurez y la confiabilidad que actualmente tiene el sistema colombiano; además, se destacan por su relevancia en la toma de decisiones para el crecimiento de Colombia, pues establecen unas normas claras que atraen inversión extranjera y protegen al país ante situaciones que puedan comprometer el suministro permanente de la energía eléctrica (Aceros y otros, 2019). A su vez, se destaca que nuevos proyectos hidroeléctricos deben ser aprobados por las entidades territoriales y, en caso de ser necesario, deben ser sometidos a consultas populares, tal y como lo expuso la Corte Constitucional en la Sentencia T-445 de 2016. De igual manera, la Autoridad de Licencias Ambientales (ANLA) publicó, en 2016, los nuevos términos de referencia para la obtención de las licencias ambientales para la construcción de centrales hidroeléctricas.

Conclusiones

Es claro el interés del país en aprovechar los privilegios de su geografía con fines hidroenergéticos, y a su vez es vital la identificación y el análisis de nuevos proyectos hidroeléctricos con una visión integral y a una escala adecuada, para así evaluar las medidas apropiadas y con ello evitar o disminuir riesgos ambientales y sociales.

En los próximos años, los cambios tecnológicos, la normativa y los hábitos de consumo pueden cambiar drásticamente el panorama energético del país. Por lo tanto, se recomienda realizar una adecuada planeación del sector eléctrico y definir políticas que garanticen un sistema confiable y robusto.

Referencias

- Aceros, C. A., Leal, C. V., Sarmiento, R., Viola, J. B., Correa, S. N., Serrano, M. F., Arenas, C. F., Galvis, J. F., Olaya, D. M., Ortiz, N., Rodríguez, M. L., Saavedra, M. G., Chávez, J., Monroy, N., Acevedo, C. G., Jaimes, L. E., Pacheco, L. E., Muñoz, Y. A., Rey, C. A., ... Hernández, N. J. (2019). *Prospectiva energética Colombia 2050*. Ediciones UIS.
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Ocampo, J. A., Herrera, G. A., Delgado, J. y Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2839-2865.
- Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., Babu, S., Borelli, P., Cheng, L., Crochetiere, H., Ehalt, H., Filgueiras, R., Goichot, M., Higgins, J., Hogan, Z., Lip, B., McClain, M. E., Meng, J., Mulligan, M., ... Zarfl, C. (2019). Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 215-221. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2320/articles/s41586-019-1111-9.pdf>
- International Hydropower Association-IHA. (24 de Mayo de 2018). *Hydropower Status Report*. Obtenido de <https://www.hydropower.org/publications/2018-hydropower-status-report>
- International Hydropower Association-IHA. (2019, 13 de mayo). *Hydropower Status Report*. <https://www.hydropower.org/status2019>
- International Renewable Energy Agency, IRENA. (2019, junio). *Renewable Energy and Jobs*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jun/IRENA_RE_Jobs_2019-report.pdf
- Montes, S. (2019, 19 de febrero). Las plantas hidroeléctricas representan 68 % de la oferta energética en Colombia. *La República*. <https://www.larepublica.co/especiales/efecto-hidroituango/las-plantas-hidroelectricas-representan-68-de-la-oferta-energetica-en-colombia-2829562>
- Semana Sostenible. (2019, 9 de mayo). Represas y embalses: grandes amenazas para los ríos. *Semana*. <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/represas-y-embalses-las-peores-amenazas-de-la-libertad-de-rios-mas-largos/44133>
- Villamizar, J. P. (2018, 2 de abril). *Las grandes represas en Colombia son un desafío para la construcción de paz*. <http://www.semillas.org.co/es/las-grandes-represas-en-colombia-son-un-desafio-para-la-construccion-de-paz>

Energía mareomotriz

En la actualidad, considerando la volatilidad en los precios del petróleo, se ha generado un interés en el mundo por incentivar la promoción, el desarrollo y el aumento del uso de nuevas formas de energía renovable y de tecnologías que sean ecológicamente racionales. En este orden de ideas, la energía marina se ha convertido en un eje en esta investigación, debido al inmenso potencial que tiene como fuente de energía renovable, aunque su nivel de desarrollo de investigación sea muy inferior al de la energía eólica o solar (Polo *et al.*, 2008).

En países de Europa y en Reino Unido existe gran interés en el sector energético mareomotriz; si llegan a desarrollar este tipo de energía, podrían captar una cuarta parte del mercado de energía marina mundial. En Asia las investigaciones sobre la producción de energía a partir de las mareas ha tomado fuerza en las últimas décadas. Así mismo, Canadá y Estados Unidos han liderado investigaciones al respecto (Quintero González y Quintero González, 2015).

Colombia, con sus dos litorales extensos y una gran superficie oceánica, tiene un gran potencial para generar energía eléctrica con fuentes marinas. Nuestro país es pionero en este campo, gracias a un estudio apoyado por el Centro de Investigación e Innovación de Energía (CIIEN), en línea con las políticas de investigación, desarrollo e innovación de alcance municipal, regional y nacional; este estudio se desarrolló entre 2010 y 2011 (Osorio *et al.*, s. f.).

Existen varias alternativas tecnológicas, según el tipo de aprovechamiento del potencial energético de las mareas y los océanos; entre ellas se encuentran la energía de las corrientes, que usa la energía cinética que poseen las corrientes marinas mediante la instalación de estructuras similares a un autogenerador; la energía mareotérmica (también llamada OTEC, *ocean thermal energy conversion*), cuyo principio de aplicación es la conversión de la diferencia de temperatura en trabajo mecánico; la energía undimotriz o energía a partir del movimiento de las olas y la potencia osmótica, o energía azul, que se obtiene mediante osmosis, debido a la diferencia de concentraciones entre el agua de mar y el agua de los ríos; estas tratan de equilibrarse por medio de una membrana permeable.

De acuerdo con los resultados, según cada tipo de aprovechamiento, se tiene:

Oleaje: los sitios con oleaje de mayor potencia y que son cercanos a centros poblados importantes con puertos están cerca de Barranquilla y Santa Marta.

En el Caribe, de acuerdo con la estacionalidad climática de la zona, el oleaje más fuerte se manifiesta en los meses de diciembre a abril, lo que coincide con la época seca del país, cuando la energía eléctrica tiene los precios más altos. En el Pacífico, aunque los valores de energía son menores que los del Caribe, estos se mantienen a lo largo del año, por lo cual es una opción interesante para el abastecimiento de las ZNI; en San Andrés y Providencia, en cambio, los valores de oleaje son demasiado bajos para pensar en un proyecto.

Mareas: considerando las condiciones geográficas y de conexión, este tipo de aprovechamiento solo sería posible en las bahías de Tumaco y Buenaventura, ya que muchos sitios en el país tienen restricciones ambientales. Se pensó que podría ser una muy buena alternativa para Buenaventura; sin embargo, los costos de las obras civiles hacen que este proyecto sea inviable.

Corrientes: las corrientes máximas en las cuencas marítimas colombianas son del orden de 70 cm/s. La recomendación para producir este tipo de energía es contar con corrientes superiores a 1,5 m/s; por lo tanto, la generación de energía mediante corrientes marinas no es factible en el país. El principal problema es que las corrientes generalmente se encuentran muy lejos de la línea costera, por lo que los costos de conexión y construcción hacen que cualquier aprovechamiento sea inviable.

Gradiente de temperatura: la plataforma continental se extiende varios kilómetros a lo largo de la costa Pacífica y de casi toda la costa Caribe; esto dificulta el acceso a las aguas frías de las profundidades, requisito para este proceso energético. Si bien el agua fría también podría obtenerse del abismo de más de 2.000 m que se encuentra en cercanías a la Sierra Nevada de Santa Marta, próximo al litoral, hay que tener en cuenta las siguientes observaciones:

La conversión de energía térmica oceánica (OTEC) tiene altos costos de inversión, y es posible que no pueda competir en la generación de energía en la red del Sistema de Transmisión Nacional (STN). Sin embargo, puede ser útil en sitios aislados, con altos consumos de energía de fuentes fósiles, donde la generación de energía eléctrica es muy costosa.

Las condiciones al sur de la isla de San Andrés cumplen con los requerimientos para la instalación de un ciclo OTEC.

Gradiente de salinidad: tanto en el océano Pacífico como en el mar Caribe desembocan grandes ríos. Sin embargo, las condiciones de marea y salinidad en ambos mares difieren significativamente.

En la zona de desembocadura del Pacífico, la marea hace que las aguas se mezclen completamente y se pierda el gradiente químico que se podría

aprovechar. Por esa razón se hizo mayor énfasis en la evaluación del potencial energético en el mar Caribe (Osorio Arias, Restrepo Agudelo, Otero, Correa y Ortega, s. f.).

La existencia de fuertes gradientes de salinidad a corta distancia en las desembocaduras del golfo de Urabá y en la bahía Barbacoas, según los resultados preliminares (Osorio Arias, Restrepo Agudelo, Otero, Correa y Ortega, s. f.), sumado a los altos caudales que descargan los ríos, indican que existe la factibilidad técnica para llevar a cabo este proyecto.

De acuerdo con los consumos energéticos reportados por la UPME en 2009, se espera que una planta en el río León genere de 5 a 6 megavatios, y que, conectada a la red de Apartadó, pueda proveer energía para 35.000 personas.

Las tecnologías para el aprovechamiento de la energía del mar, proveniente bien sea de olas, corrientes, mareas, gradientes de salinidad o gradientes de temperatura, han tenido un importante desarrollo en los últimos años:

- La energía relacionada con las mareas ha llegado a la fase comercial.
- Las tecnologías para el aprovechamiento de las olas y las corrientes han avanzado hasta una etapa precomercial.
- Los desarrollos asociados al gradiente de temperatura y al gradiente de salinidad aún deben superar limitaciones técnicas para convertirse en una alternativa confiable.

En el diseño de un eventual proyecto de planta piloto, se tuvieron en cuenta los factores ambientales (áreas de influencia y caracterización biótica y socio-económica), físicos (análisis de batimetrías, geología marina y terrestre clima marítimo, hidrología y líneas de transmisión) y técnico-económicos (desempeño de alternativas de proyectos) requeridos

(Osorio Arias, Restrepo Agudelo, Otero, Correa y Ortega, s. f.). Los proyectos más adecuados para iniciar una segunda fase de investigación serían los siguientes:

- Aprovechamiento del oleaje en Santa Marta y Bahía Solano
- Proyecto de gradiente salino en Pasacaballos, Canal del Dique.
- Aprovechamiento de gradiente térmico (OTEC) en San Andrés.

Considerando los estudios actuales y la tecnología disponible, el aprovechamiento del potencial energético es posible en la costa Pacífica colombiana, debido a que las mareas son superiores a los 3 m. Como parte de este estudio (Osorio Arias, Restrepo Agudelo, Otero, Correa y Ortega, s. f.), se encontraron 45 posibles bahías en el litoral Pacífico, cuyo potencial energético se calculó en 120 MW; de los cuales cabe destacar a Bahía Málaga, con 3,5 MW, y la ensenada de Tribuga, con 0,5 MW, como zonas con potencial energético importante para las necesidades de las comunidades cercanas. Así mismo, Punta Catripe, con 8 MW; Bocana Bazán, con 6 MW, y Boca Naya, con 13 MW, son interesantes por su potencial energético (Polo *et al.*, 2008).

A partir de lo anterior es posible concluir que la confiabilidad y la oportunidad de tener cientos de megavatios instalados muy cerca de centros poblados en el Caribe convierten el aprovechamiento de los gradientes salinos en un objetivo estratégico para el sector eléctrico colombiano de mediano a largo plazo.

La energía del gradiente salino no será una realidad en el corto plazo, pero no es conveniente aplazar las investigaciones hasta que la tecnología entre en un estado avanzado. El estudio de la energía del gradiente salino dará una posición beneficiosa en el momento en que la tecnología rompa las barreras necesarias (Osorio *et al.*, s. f.).

En el corto plazo, las opciones más atractivas se presentan en el oleaje; el tipo de tecnología desarrollado en la Universidad de Upsala (que se encuentra en fase muy avanzada) se podría aprovechar en mares de olas poco energéticas, como es el caso del Caribe colombiano.

En la costa Atlántica, el modelo utilizado no mostró velocidades de más de 1,2 m/s para ningún sitio, excepto en la Ciénaga Grande de Santa Marta, debido a su gran tamaño. Según los resultados de la valoración económica, el punto más apropiado para una eventual planta piloto puede ser en cercanías a Santa Marta, debido a su proximidad a un puerto y a centros poblados, así como por los buenos valores de energía y por los pocos efectos ambientales que podría tener un proyecto allí; sin embargo, no es utilizable en el corto plazo, debido a que su salida al mar se encuentra bloqueada por una carretera.

El gradiente térmico presenta una oportunidad valiosa para el suministro de energía con fuentes limpias en la isla de San Andrés; sin embargo, puede tener efectos ambientales causados por el bombeo de aguas frías. Al ser un área protegida requiere estudios más detallados para intentar una planta piloto en esta zona.

Referencias

- Osorio Arias, A. F., Restrepo Agudelo, P., Otero, L., Correa, J. y Ortega, S. (s. f.). *Las energías del mar. Propiedad Pública*. <http://www.propiedadpublica.com.co/las-energias-del-mar/>
- Polo, J., Jorge, R. y Armando, S. (2008). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*.
- Quintero González, J. R. y Quintero González, L. E. (2015). Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente. *Gestión y Ambiente*, 18(2), 121-134.

Hidrógeno: el vector energético del mañana

El hidrógeno es un elemento altamente inflamable, de amplio uso en varias industrias para diferentes propósitos; particularmente, en el aspecto energético puede ser utilizado como método de almacenamiento de energía, como fuente de poder para motores eléctricos y como elemento base para la creación de combustibles sintéticos y gas natural.

El principal problema con el hidrógeno es su amplio rango de explosividad cuando se mezcla con el aire; para manipularlo se requiere tomar las medidas de seguridad adecuadas.

A pesar de que es el elemento más común en el universo, el hidrógeno no se encuentra libre en el planeta, y los métodos más usados para su separación son costosos y dependen principalmente del uso de combustibles fósiles. Sin embargo, con el desarrollo y el mejoramiento de la tecnología, se han encontrado formas de reducir el costo de separar este elemento, e incluso se han empezado a utilizar energías renovables para ello y así disminuir en gran medida su impacto ambiental.

Hidrógeno a partir de energías renovables

La electrólisis es una forma de producir hidrógeno a base de agua y energía eléctrica; consiste en utilizar una corriente alta para separar el oxígeno del hidrógeno en las moléculas del agua. Esto abre la posibilidad de crear hidrógeno con cero emisiones de CO₂, utilizando la energía eléctrica producida por una planta solar o eólica (Bessarbov, D., *et al*, 2018).

Hidrógeno a partir de la biomasa

Es posible producir hidrógeno usando la biomasa como fuente principal; esto se logra mediante un proceso de gasificación (Balat *et al.*, 2010). Colombia dispone de muchas reservas de biomasa (Gauch, 2012), y, por ende, tiene el potencial para aprovecharla como materia prima en la creación de hidrógeno.

Posibles usos

El hidrógeno es un elemento muy versátil; estos son algunos de sus usos más importantes (Air Liquide, 2019; IRENA, 2018):

- Producción de combustibles sintéticos: es posible crear distintos tipos de combustibles, como gasolina, diésel, kerosene o gas natural, combinando hidrógeno y otros compuestos, como el gas carbónico.
- Motores eléctricos: utilizando el hidrógeno como materia prima, es posible utilizar celdas de combustible que producen energía para impulsar un vehículo, cuyo único residuo es agua. Esta tecnología está siendo ampliamente estudiada en el mundo.

- Transportador de energía: el hidrógeno representa una alternativa para llevar energía a lugares que no están conectados a una red eléctrica, pues este puede ser simplemente transportado y luego transformado en el tipo de energía requerida.
- Usos en la industria: el hidrógeno es usado principalmente por la industria química para producir distintos compuestos; tiene un rol importante en el proceso de refinación del petróleo y está presente, en menor medida, en industrias como la del acero.

Hidrógeno en Colombia

En el país se encuentran únicamente dos empresas que trabajan directamente en procesos de producción y almacenamiento de hidrógeno con fines energéticos; una de ellas es de origen español, Ecowill Engineering Group, y la otra es de Francia, McPhy Energy. Ambas empresas han demostrado su interés en la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, biodiésel y biomasa (Martínez *et al.*, 2013).

Colombia y Latinoamérica, en general, han dejado a un lado la investigación de posibles usos y patentes para este elemento, y han producido únicamente el 1 % de los artículos mundiales sobre este tema.

Oportunidades para disminuir la emisión de gas carbónico del país

Colombia está buscando disminuir su huella de carbono en el mundo; para cumplir esta meta, se tiene planeada la apertura de diferentes parques de producción de energía renovable. El hidrógeno tiene la capacidad para llevar este tipo de energía a sectores dominados por los combustibles fósiles, lo cual permitirá reducir su impacto climático.

En Colombia existen grandes fuentes de biomasa y biocombustibles que pueden ser utilizadas, entre otras cosas, para la fabricación de hidrógeno que pueda ser convertido posteriormente en gas natural. De esta manera, sería posible aumentar en la nación la producción de este último gas, sin intensificar la emisión de gas carbónico (González, 2019).

Posibles políticas

- Fomentar la investigación sobre la producción y el uso del hidrógeno como método limpio para la producción, el transporte y el almacenamiento de energía.
- Impulsar proyectos que utilicen electrólisis para generar hidrógeno a base de energía eléctrica e implementarlos en plantas de energía renovable.
- Apoyar proyectos piloto que utilicen biomasa para generar hidrógeno, por medio de la gasificación.
- Promover el desarrollo de la producción de gas natural a base de hidrógeno y dióxido de carbono.
- Ofrecer beneficios tributarios para empresas y organizaciones que utilicen hidrógeno producido por biomasa o energías renovables para aumentar su demanda.
- Entregar beneficios tributarios para empresas que utilicen gas natural producido a base de hidrógeno limpio.
- Propiciar la creación de una asociación que fortalezca el intercambio académico internacional y que apoye el desarrollo de nuevos proyectos sobre el tema.

Referencias

- Bassarbov, D. y Millet, P. (2018). *Brief historical background of water electrolysis*. <https://www.elsevier.com/books/pem-water-electrolysis/bessarabov/978-0-12-811145-1>
- Balat, H. y Kirtay, E. (2010). *Hydrogen from biomass-present scenario and future prospects*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910008396?casa_token=3zpx4Jbtu80AAAAA:P4kZKrFPMZFy_wE8nB3IAffmFnUej46BXrMBzBOy57eGjpwN9oaANgwZkQ3FqCrkn-J7oybCLXmqC
- Air Liquide. (2019). *Hydrogen*. <https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/uses-hydrogen>
- International Renewable Energy Agency, IRENA. (2018). *Hydrogen from renewable. Technology outlook for the energy transition*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf
- Gauch, M. (2012). *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. Energía sostenible para Colombia*. <https://www.fedebiocombustibles.com/files/EvaluacionDelCicloDeVid>
- Martinez, A., Barreneche, D., Bellon, D., Plata, D., Latorre, D., Porras, A., Rincón, L. (2013). *Estudio de factibilidad del hidrógeno en Colombia*. <https://www.acofipapers.org/index.php/acofipapers/2013/paper/viewFile/580/90>
- Aceros, C. A., Leal, C. V., Sarmiento, R., Viola, J. B., Correa, S. N., Serrano, M. F., Arenas, C. F., Galvis, J. F., Olaya, D. M., Ortiz, N., Rodríguez, M. L., Saavedra, M. G., Chávez, J., Monroy, N., Acevedo, C. G., Jaimes, L. E., Pachecho, L. E., Muñoz, Y. A., Rey, C. A., ... Hernández, N. J. (2019). *Prospectiva energética Colombia 2050*. Ediciones UIS.

