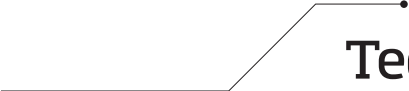




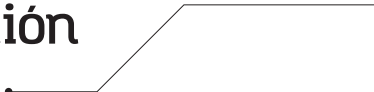
Tecnologías disruptivas del proceso de globalización

Disruptive technologies
of the globalization process

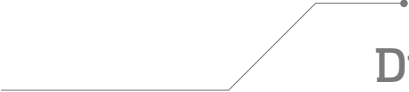
Jesús Alberto Navas-Sierra
(Editor)



Tecnologías disruptivas del proceso de globalización



Jesús Alberto Navas-Sierra
(Editor)



**Disruptive technologies
of the globalization process**



Resumen

Para la elaboración de los capítulos que conforman este libro, se convocó a catorce reconocidos especialistas latinoamericanos para cubrir nueve temas fundamentales. Cinco autores son mexicanos, siete colombianos y dos estadounidenses. Sus aportes son resultado de su experiencia académica y profesional en las áreas tratadas por cada uno de ellos. Sin embargo, como es propio a la bibliografía del caso, este primer volumen de la colección Pensamiento global, no abarca la totalidad de temáticas que, por su vertiginosa dinámica, sobrepasa cualquier intento editorial al respecto. Por lo mismo, este aporte del Centro de Pensamiento Global (CEPEG) tiene como objetivo principal la divulgación didáctica de una de las más complejas tendencias del actual proceso globalizador. Su contenido y lenguaje combinan lo puramente técnico con lo propiamente divulgativo, con el fin de alcanzar la más amplia y plural audiencia.

Como se advierte en un principio, la ‘disrupción’ en sí no es un fenómeno económico y tecnológico que hubiera aparecido con el actual proceso de globalización. Simplemente, tomó una dinámica inusitada que en algunos casos —como el de la ‘inteligencia artificial’ (IA)— parece augurar un futuro humano ciertamente impredecible. Sin poder predecir los muchos futuros posibles de esa humanidad posglobal, el presente libro recoge muchas de estas inquietudes y sugiere opciones válidas de reflexión.

Palabras claves: biogenética, globalización, impresión 3D, informática, inteligencia artificial, internet de las cosas, nanotecnología, robótica, tecnologías disruptivas

¿Cómo citar este libro? / How to cite this book?

Navas-Sierra, J. A. (Ed.) (2019). *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización*. Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268>

Abstract

For the writing of this book, fourteen recognized Latin American specialists were invited to cover nine fundamental topics. Five authors are Mexican, seven Colombian and two North American. Their contributions are the result of their academic and professional experience in the areas treated by each one of them. However, as is proper to the bibliography of the case, this first volume of the collection Pensamiento global does not cover the totality of topics that, due to its vertiginous dynamic, surpasses any editorial attempt in this regard. For this reason, this contribution of the Centro de Pensamiento Global (CEPEG) has as its main objective the didactic disclosure of one of the most complex trends of the current globalization process. Its content and language combine the purely technical with the properly informative, in order to reach the widest and most diverse audience. As it is noticed at the beginning of the book, the 'disruption' itself is not an economic and technological phenomenon that would have appeared with the current globalization process. It simply took an unusual dynamic that in some cases --such as that of "artificial intelligence" (AI) -- seems to augur a human future that is certainly unpredictable. Without being able to predict the many possible futures of that post-global humanity, this book collects many of these concerns and suggests valid options for reflection.

Keywords: biogenetics, globalization, 3D printing, computer science, artificial intelligence, internet of things, nanotechnology, robotics, disruptive technologies

¿Cómo citar este libro? / How to cite this book?

Navas-Sierra, J. A. (Ed.) (2019). *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización*. Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268>

Tecnologías disruptivas del proceso de globalización

Jesús Alberto Navas-Sierra
(Editor)

Disruptive technologies
of the globalization process



Universidad Cooperativa
de Colombia



EDICIONES
Universidad Cooperativa
de Colombia

Tecnologías disruptivas del proceso de globalización - disruptive technologies of the globalization process / Jesús Alberto Navas-Sierra (editor) ; autores, Silvia Johana Cañas Duarte ... [et al.]. - Bogotá : Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.

p. - (Colección pensamiento global)

Incluye datos biográficos de los autores. -- Incluye referencias bibliográficas. -- Texto en español con resumen en inglés.

ISBN 978-958-760-125-1 -- 978-958-760-126-8 (digital)

1. Tecnologías disruptivas 2. Innovaciones tecnológicas
I. Navas Sierra, Jesús Alberto, ed. II. Cañas Duarte, Silvia Johana III. Serie

CDD: 303.4834 ed. 23 / 338.064

CO-BoBN- a1038588

Título libro

Tecnologías disruptivas del proceso de globalización

© Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá, febrero del 2019

© Jesús Alberto Navas-Sierra (Ed.), Silvia Johana Cañas-Duarte, Jaime Enrique Cascante-Vega, Geraldine Andrea Cuéllar-Alturo, Mario Fernando De la Rosa-Rosero, Guillermo Foladori, Miguel García-Guerrero, Noela Invernizzi, Juan Guillermo Lalinde-Pulido, Gloria Lizeth Ochoa-Adame, María Isabel Pérez-López, Olga Lucía Quintero-Montoya, Roberto Javier Rueda-Esteban, María José Serna-Ayala, Aldo Josafat Torres-García

ISBN (impreso): 978-958-760-125-1 ISBN (digital): 978-958-760-126-8

DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268>

Colección Pensamiento Global

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: septiembre del 2017

Evaluación propuesta de obra: marzo del 2018

Evaluación de contenidos: 22 de agosto del 2018

Correcciones de autor: septiembre del 2018

Aprobación: octubre del 2018

Fondo editorial

Director Nacional Editorial, Julián Pacheco Martínez

Especialista en Gestión Editorial, Daniel Urquijo Molina

Especialista en Producción Editorial (libros), Camilo Moncada Morales

Especialista en Producción Editorial (revistas), Andrés Felipe Andrade Cañón

Analista editorial, Claudia Carolina Caicedo Baquero

Proceso editorial

Corrección de estilo y lectura de pruebas, María Carolina Ochoa

Diagramación y diseño de portada, Diego Abello Rico

Impresión, Xpress Estudio Gráfico y Digital S.A.S.



Universidad Cooperativa
de Colombia



EDICIONES
Universidad Cooperativa
de Colombia



Pensamiento
Global

Impreso en Bogotá, Colombia.
Depósito legal según el Decreto 460 de 1995.

Contenido

Introducción	13
<i>Edgar Vieira-Posada</i>	
Las innovaciones disruptivas: el punto de vista de las humanidades	23
<i>Disruptive innovations: the Humanities point of view</i>	
<i>Jesús Alberto Navas-Sierra</i>	
Una visión crítica de las nanotecnologías disruptivas	63
<i>A critical vision of Disruptive Nanotechnologies</i>	
<i>Guillermo Ricardo Foladori y Noela Invernizzi</i>	
La fiebre de las nanotecnologías: promesas, inversión y resultados cortos en la era de la tecnociencia	85
<i>The fever of nanotechnologies: promises, investment and short results in the era of technoscience</i>	
<i>Miguel García-Guerrero</i>	
Edición de genomas con CRISPR/Cas9	107
<i>Editing genomes with CRISPR / Cas9</i>	
<i>Silvia Johana Cañas-Duarte y María Isabel Pérez-López</i>	
El futuro de la informática	129
<i>The Future of Information Technology</i>	
<i>Juan Guillermo Lalinde-Pulido</i>	
Impacto de la impresión 3D en los mecanismos principales de la globalización	151
<i>Impact of 3D printing on the main mechanisms of globalization</i>	
<i>Geraldine Andrea Cuéllar-Alturo, Roberto Javier Rueda-Esteban, Jaime Enrique Cascante-Vega y Mariajosé Serna-Ayala</i>	

Avances de la robótica	171
Advances in Robotics	
<i>Mario Fernando De la Rosa-Rosero</i>	
Las posibilidades de desarrollo de inteligencia artificial	195
The possibilities of artificial intelligence development	
<i>Olga Lucía Quintero-Montoya</i>	
Impacto de cambios tecnológicos en el trabajo: una revisión de la evidencia empírica para América Latina	215
Impact of technological changes in the workplace: a review of the empirical evidence for Latin America	
<i>Gloria Lizeth Ochoa-Adame y Aldo Torres-García</i>	

Introducción

Con este libro sobre tecnologías disruptivas en el contexto del proceso globalizador, se inicia la Colección Pensamiento Global del Centro de Pensamiento Global – CEPEG, en cumplimiento de sus responsabilidades de difundir y poner al alcance de profesores, estudiantes e interesados los hechos y cambios principales que vive el mundo; estos serán abordados de manera simultánea en una misma publicación por diversos autores, lo que permite mayor diversidad temática y la incorporación de perspectivas diferentes. Se trata de obras de investigación y de divulgación científica, con la participación de autores de diversa procedencia universitaria, algunos como resultado de convocatoria nacional e internacional.

Se da comienzo a la Colección Pensamiento Global con el tema de las tecnologías disruptivas; son disruptivas porque rompen lo tecnológico anterior y generan nuevas cadenas de producción, de materiales, de fuentes de energía, de medios de transmisión, de nuevas funcionalidades. Estos cambios bruscos son característica esencial del proceso de globalización multidimensional en el que se encuentra el mundo hace ya más de veinticinco años, en los que las transformaciones en curso y los efectos a corto y a mediano plazo aportados por las tecnologías disruptivas modificarán las condiciones productivas y de vida hasta ahora conocidas, en lo que constituye el ingreso a una cuarta revolución industrial con presencia de la nanotecnología, la biogenética, la informática y la computación, el Internet de las cosas (*Internet of things* - IoT), la impresión 3D, la robotización y la inteligencia artificial, entre las más sobresalientes.

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Vieira-Posada, E. (2019). Introducción. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 13-21). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268>

Este impacto preponderante de lo tecnológico en procesos multidimensionales de globalización¹ ha ocurrido no solo en la actual etapa de globalización, sino también en etapas anteriores. Fue el caso de la primera etapa eurocéntrica del siglo xv en tiempos del Renacimiento y la Reforma, en la que Europa aprovechó conocimientos de las culturas griega, árabe, hindú y china en imprenta, papel, lentes, pólvora, altos hornos, telares, matemáticas y astronomía, y en el desarrollo de instrumentos náuticos como la brújula, la ballestilla, el astrolabio y el catalejo, para lanzarse mar abierto a la realización de grandes descubrimientos territoriales y al establecimiento de una primera interacción planetaria de comercio transcontinental con participación de antiguos continentes como el europeo, el asiático y el africano, y con el involucramiento del nuevo continente americano.

La segunda etapa de globalización se produjo entre mediados del siglo xix y comienzos del siglo xx, etapa también eurocéntrica con la fase de expansión de los imperios europeos durante la segunda revolución industrial de consolidación del capitalismo; época de gran intercambio mundial gracias a avances tecnológicos en buques de turbina de vapor y casco de acero, la aparición del ferrocarril, la construcción de los dos canales interoceánicos de Suez y de Panamá que acortaron distancias, la comunicación transcontinental entre Europa y América por el cable submarino y el telégrafo; la comunicación interna por el teléfono, el automóvil, la bicicleta y el metro y la comunicación externa por la aviación; y los inventos de la electricidad, la radio, el cine, la fotografía y el gramófono, entre los más destacados. De igual forma, contribuyeron el meridiano cero de Greenwich para la unificación de los horarios a nivel planetario y grandes avances de la ciencia a inicios del siglo xx con el descubrimiento de Louis Pasteur de microbios y bacterias, la teoría de la relatividad de Albert Einstein y el principio de indeterminación de la física cuántica de Karl Heisenberg. Todos implicaron un salto cualitativo en el conocimiento y en las condiciones de vida de la humanidad, y prepararon el terreno para la actual etapa de globalización desarrollada a partir de los años ochenta y noventa bajo el liderazgo de Estados Unidos y el reposicionamiento de China en la escena internacional.

La actual etapa del proceso globalizador se sustenta también en profundos e impactantes avances tecnológicos, comenzando por la *revolución de las comunicaciones* con el surgimiento en los años setenta de Internet y su gradual masificación, que ha permitido la universalización del proceso al volver el mundo

1 Ver al respecto el capítulo 5 de mi libro *La globalización en un mundo en transformación* (2012), de la Colección Globalización e Integración del Colegio de Estudios Superiores de Administración – CESA, Bogotá; y el capítulo 2 de mi libro *Los actuales desafíos del proceso de globalización* (2016), de la Colección Acontecer Mundial del Centro de Pensamiento Global – CEPEG de la Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá.

interdependiente e interconectado². Internet estuvo acompañado del proceso de miniaturización de los componentes electrónicos, en el que la revolución de los chips y microprocesadores permitió llegar al *personal computer* o PC, lo cual facilitó el desarrollo de la *industria aeroespacial*, de los viajes tripulados al espacio y de la *comunicación satelital*, que contribuye a la interconexión del planeta. Pero no se trata solamente del Internet de las personas con acceso móvil de banda ancha, teléfonos inteligentes y aplicaciones de las redes sociales, sino también del complemento con el IoT, que conducirá a la interacción entre humanos y cosas con una presencia multipropósito de Internet en pantallas murales en toda clase de sitios.

Uno de los resultados más importantes y de mayor alcance del proceso de miniaturización ha sido el desarrollo de la *nanotecnología*, que permite el trabajo mediante potentes microscopios electrónicos al nivel de partículas elementales de átomos y moléculas en tamaños de una millonésima de milímetro (un nano), con grandes posibilidades en el desarrollo de nuevos materiales como los nanotubos de carbono o el grafeno, y en campos de la informática, la química, la física y la medicina, entre otros. Esto ha conducido a una miniaturización mayor y a la aparición de diversas partículas subatómicas, las cuales se trabajan en el gran colisionador de hadrones en la frontera entre Suiza y Francia, donde se experimenta en la reproducción del *Big Bang* y en la comprobación de la existencia de componentes desconocidos del universo como la materia y la energía oscura.

En paralelo a llegar al origen de la materia mediante el trabajo a nivel de átomos en la nanotecnología, la humanidad avanzó todavía más profundamente al lograr el acceso a la composición de la célula, que es el origen mismo de la vida, mediante los espectaculares avances en *biogenética*. Ya desde el siglo pasado se había descubierto la estructura del ADN (ácido desoxirribonucleico), el responsable de la herencia genética a través de los códigos de la vida representados en los ácidos nucleicos A, T, C y G (adenina, timina, citosina y guanina). Esto permitió avanzar en genética molecular y desarrollar el Proyecto Genoma Humano para trabajar en la secuenciación del ADN de las personas, con proyecciones de grandes cambios en las condiciones de vida de los habitantes del planeta.

2 Los avances en la comunicación humana han sido sorprendentes y permanentes, con la generalización del correo electrónico, la aparición de las redes sociales, los videos, video-llamadas y videos digitales, la reproducción de música, el uso de agendas electrónicas, el GPS y la navegación por Internet, el teléfono inteligente o *smartphone*, el acceso con redes inalámbricas (wifi), la USB, la conexión sin cable *bluetooth* y las plataformas de comunicación en la nube. Y seguirá desarrollándose con la incorporación de redes móviles para mayor comunicación de la población mundial y la utilización de una red móvil 5G con velocidad máxima superior a 10 gbps (gigas por segundo).

La nanotecnología, la biogenética y la informática han avanzado en diferentes combinaciones como bionanotecnología, bioinformática, nanoelectrónica, nanotecnología molecular o nanoingeniería y nanomedicina, fusionando la física y la medicina en nuevas ramas de medicina molecular y medicina genómica.

Uno de los avances tecnológicos que se está desarrollando en tiempos inferiores a los previstos inicialmente es el de la *robotización*, que luego de comenzar en la fase industrial con el reemplazo de operaciones repetitivas (como poner remaches en el chasis de la línea de ensamble automotriz), ha ido traspasando cada vez más funciones del ser humano a la máquina en un proceso de robotización acelerada, en países desarrollados e incluso en países poseedores de abundante mano de obra como China, en busca de mayor productividad y, por consiguiente, de mayor competitividad; así como al mejoramiento de las condiciones de vida principalmente de poblaciones de adultos mayores, con el acompañamiento y la realización de todo tipo de tareas domésticas por parte de robots humanoides.

La nanotecnología está y estará más presente en nuevas aplicaciones y nuevos materiales como los nanotubos de carbono o el grafeno ya mencionados, que irán sustituyendo materiales de uso tradicional hasta ahora como el acero o el silicio. La bionanotecnología, las posibilidades de reingeniería del cuerpo humano y la combinación con otras tecnologías novedosas, como la computación, la biogenética y la robotización con el desarrollo, por ejemplo, de nanorrobots, permitirán cambios de gran impacto en la medicina, que ya no será curativa sino preventiva, con la significativa prolongación de la longevidad de los seres humanos y su impacto en las condiciones de trabajo y en los regímenes de pensiones.

Se está en un crecimiento exponencial de la capacidad en la tecnología de la *información*, en el que la parte no biológica de la inteligencia será mucho más poderosa que la inteligencia humana producto de la biología, pues antes de lo previsto se han producido espectaculares avances en *computación* y en *inteligencia artificial*, y en la combinación de estos con la *robotización*.³ Ya son una realidad los primeros equipos de qbits de operaciones simultáneas en *computación cuántica* en países como Estados Unidos, Reino Unido y China; la experimentación de los primeros robots incorporando mayor información y mayor autonomía y el desarrollo de la inteligencia artificial con el apoyo de información en la nube (*cloud computing*); el *aprendizaje de máquinas* (*machine learning*) utilizando técnicas del *big*

3 Según Ray Kurzweil (2012), estudioso de los avances tecnológicos y autor de *La singularidad está cerca*, en computación se procurará desarrollar: circuitos de nanotubos; computación molecular; autoensamblado de circuitos de nanotubos (por avance de la nanotecnología); sistemas biológicos que emularán circuitos de ensamblado con proteínas autorreplicantes (por avance de la biogenética); computación con ADN, con el *spin* de electrones, con luz láser; y la computación cuántica (a la que acabamos de hacer referencia).

data y de la construcción de mejores algoritmos; y el *aprendizaje profundo* (*deep learning*), en el que un conjunto de algoritmos de cómputo avanzado procesan una cantidad masiva de datos, “aprendiendo” en el proceso a detectar patrones y anomalías.

Es que el ritmo de los cambios tecnológicos será tan rápido y su repercusión será tan profunda que la vida humana se verá transformada de forma irreversible en las próximas dos décadas. Pero cambios tan pronunciados y tan rápidos son difíciles de asimilar y generan reacciones contrarias de muchas personas, principalmente del medio rural o de baja cualificación profesional cuando la brecha formativa es mayor, quienes ven con temor las consecuencias en las condiciones de trabajo. El peligro real de efectos negativos en las *condiciones de empleo*, sobre todo en Latinoamérica, y la sustitución gradual del ser humano por la máquina son realidades de los cambios tecnológicos que hay que saber enfrentar si no se quiere que incluso en el campo de la política continúe incrementándose la votación antisistema.

La realidad es que labores de menor cualificación, y de menor exigencia de formación, conocimiento y raciocinio, están más expuestas a situaciones de desempleo, por lo cual uno de los retos de los gobiernos y de las universidades será ayudar a la incorporación en la modernidad, mediante la recomposición de los programas de educación que capaciten mejor a las nuevas generaciones y mejoren el *nivel de formación cualificada* de quienes ya están en el mercado laboral para que logren reposicionarse más fácilmente.

Inteligencia artificial y *robotización* comenzarán muy pronto a cambiar definitivamente los paradigmas dominantes hasta ahora en las sociedades, cuya preocupación no debe ser tanto que en un mundo futuro nos dominen las máquinas, sino que el peligro real es el mal uso que podrán hacer de ellas los seres humanos. Unos seres humanos con mayor tiempo libre como consecuencia de la robotización de las operaciones laborales, donde habrá que *reinventar la educación de los adultos* antes de que se consolide, como dice el historiador israelí Yuval Noah Harari, una nueva clase social “inútil”.

Otro reto es prepararse para consecuencias negativas del avance tecnológico en el manejo y la circulación de la información y del conocimiento, dada la concentración cada vez más evidente de las *grandes bases de datos* (*big data*), cuyo control por unos pocos será una grave amenaza para las libertades y para la misma democracia. El tema de la ciberseguridad pasa a ser una prioridad mundial, pues cada vez más países están empezando a incorporar capacidades cibernéticas a sus herramientas gubernamentales y los ataques cibernéticos se pueden convertir en una herramienta de lucha que supere varios de los armamentos más sofisticados, lo que convierte a la ciberseguridad de los aparatos de IoT en una cuestión estratégica de la era digital, donde habrá que asegurar la seguridad de los dispositivos

conectados a Internet ante la generalización de ataques de los *hackers* a todo tipo de aparatos conectados.

A su vez, tiene lugar el facilismo en la obtención de *información superficial y rápida* que desestimula y limita el análisis y la investigación de mayor profundidad; y la peligrosa propagación, tergiversación y uso de *informaciones falsas* (*fake news* y *deepfake*) que desestabilizan gobiernos, cambian resultados electorales y destrozan reputaciones personales, lo cual puede no convertir los avances de las tecnologías disruptivas en la oportunidad esperada para contar con un mayor desarrollo y mejoramiento de las condiciones de vida, y en su lugar volverse una época complicada de uso de peligrosas herramientas de desestabilización de la sociedad y del mismo orden mundial.

Con la advertencia anterior, la generalización gradual de vehículos autoconducidos y de sistemas supereficientes de transporte, el intercambio masivo de información con la *big data* y el IoT, el comercio de bienes y servicios digitales, la incorporación de robots en la enseñanza y en la cirugía, la computación inteligente de desempeño ultraalto, los avances en ciencias cognitivas y en tecnología de robótica humanoide, la biodiversidad y conservación de los recursos naturales, la bioseguridad y tecnología de defensa, las tecnologías de nanomateriales, de medicina regenerativa o de satélites, la tecnología inmersiva de entretenimiento, son algunas de las áreas prioritarias del sorprendente desarrollo de tecnologías disruptivas en la cuarta revolución industrial que caracteriza el actual proceso de globalización, en el que se borran los límites entre lo físico, lo digital y lo biológico, y sobre las cuales el conjunto de la sociedad debe disponer de unos conocimientos básicos acerca de sus desarrollos y consecuencias.

Desde la dirección del Centro de Pensamiento Global (CEPEG) de la Universidad Cooperativa de Colombia, tenemos como editor invitado de este primer libro de la Colección Pensamiento Global al historiador e investigador en ciencias sociales Jesús Alberto Navas-Sierra, quien además de la organización y revisión del presente volumen, escribió el primer capítulo en el que analiza y desarrolla un importante marco teórico sobre las tecnologías o innovaciones disruptivas.

Estructura de la obra

En el primer capítulo: *Las innovaciones disruptivas. El punto de vista de las humanidades*, el editor invitado Alberto Navas Sierra analiza el marco conceptual y teórico en el que se ha desarrollado desde la década de los noventa el concepto de tecnologías o innovaciones disruptivas en la Escuela de Negocios de Harvard (ENH), principalmente por C. Christensen, la versión modernizada que esta puede representar de la ‘destrucción creativa’ de J. A. Schumpeter, y las críticas y respu-

tas a otros autores críticos de Christensen. Queda planteado si la innovación debe ‘disrumpir’ todo para que la sociedad tenga cosas nuevas y mejores, y si además de exponencial y globalizante, será más y más impredecible y toda afectación disruptiva es y será irreversible, por lo que según el editor invitado la vida individual y el orden socioeconómico nunca más volverán a ser los mismos.

En el segundo capítulo: *Una visión crítica de las nanotecnologías disruptivas*, Guillermo Foladori, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México, y Noela Invernizzi, de la Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil, analizan el carácter disruptivo con el que las nanotecnologías se desarrollan en un contexto económico mundial con el cambio en las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los materiales en nanoescala, y un contexto sociopolítico dominado por las grandes compañías, pero donde algunas naciones emergentes van encontrando también un nicho. Se evalúan sus beneficios y también sus efectos perjudiciales, así como las barreras potenciales de contribuir a un desarrollo inclusivo.

En el tercer capítulo: *La fiebre de las nanotecnologías: promesas, inversión y resultados cortos en la era de la tecnociencia*, Miguel García-Guerrero, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México, hace una recopilación histórica acerca del átomo, la física cuántica y la ingeniería molecular, componentes fundamentales del trabajo a escala “nano” en el que las propiedades físicas y químicas de los materiales son tremendamente diferentes a las de objetos más grandes; y también sobre la orientación investigativa y productiva hacia nanopartículas útiles en el mercado; el aporte posible como tecnología de carácter general a otras tecnologías, principalmente en seis grandes áreas; así como la necesidad de profundizar sobre posibles riesgos en los que participen sectores sociales.

En el cuarto capítulo: *Edición de genomas con CRISPR/Cas9*, Silvia Johana Cañas-Duarte, del Departamento de Biología de Sistemas de Harvard Medical School, Boston, Estados Unidos, y María Isabel Pérez-López, asistente del mismo departamento, analizan la revolución en el área de la ingeniería genética representada por un sistema que permite realizar de manera sencilla modificaciones precisas en el ADN al adicionar, remover o alterar elementos en la secuencia de ADN en posiciones específicas del cromosoma de un organismo (elementos que contienen el material genético en el núcleo de las células), y señalan su aplicación en la agricultura, la industria de biocombustibles, la medicina personalizada y la terapia génica para enfermedades genéticas. Las autoras explican su historia, las características que lo hacen revolucionario, exploran algunas de las aplicaciones en las que ha sido implementado y comentan su futuro.

En el quinto capítulo: *El futuro de la informática*, Juan G. Lalinde Pulido, de la Universidad Eafit de Medellín, Colombia, explica el origen y estado actual de la informática, define lo que es un algoritmo y establece sus limitaciones, y explica las

tecnologías de la información y las comunicaciones (Internet, Internet de las cosas y *big data*), el crecimiento exponencial en capacidad de cómputo y almacenamiento y en velocidad de transmisión de la información, nuevas técnicas de aprendizaje de máquinas basadas en inteligencia artificial, la relación entre la informática y las ciencias de la información, nuevas formas de computación como la biológica y la cuántica, y explora posibles escenarios sobre la informática, las posibilidades del *blockchain* y el aprendizaje de máquinas y el aprendizaje profundo, la inteligencia artificial y el futuro de la informática.

En el sexto capítulo: *Impacto de la impresión 3D en los mecanismos principales de la globalización*, Roberto Javier Rueda-Esteban, Jaime Enrique Cascante-Vega, Geraldine Andrea Cuéllar-Alturo y Mariajosé Serna-Ayala, de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, explican las diferencias existentes entre distintas tecnologías de impresión 3D, con sus respectivos alcances y aplicaciones en la medicina (medicina regenerativa, ortopedia y educación médica), en usos industriales (materiales metálicos, motores), en armas, en joyería y moda, y en arquitectura y gastronomía. Así, finalizan evaluando cómo la impresión 3D puede favorecer o interrumpir las dinámicas del proceso de globalización facilitando el regreso de empresas medianas y pequeñas a la producción local y al tiempo su incorporación a grandes compañías con el desarrollo de nuevos prototipos y situaciones de mayor accesibilidad mundial.

En el séptimo capítulo: *Avances de la robótica*, Mario Fernando De la Rosa-Rosero, de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, considera diversas soluciones disruptivas que la robótica industrial y la robótica móvil están aportando en las actividades cotidianas de la vida de las personas y de la sociedad: transporte (vehículos autónomos, vehículos de asistencia a discapacitados, vehículos aéreos o drones y vehículos de exploración espacial), manufactura y cadenas de abastecimiento (automatización, robótica industrial y móvil, manufactura ecológica, movilidad en bodega, robótica cooperativa), medicina (procedimientos quirúrgicos, conexión cerebral-muscular, robots móviles en hospitales, telemedicina y prótesis), robótica de servicio para público y profesionales (robots de ayuda en oficios, en entretenimiento, en acompañamiento, vigilancia, agricultura, minería, hotelería), fábricas robotizadas y educación e investigación.

En el octavo capítulo: *Las posibilidades de desarrollo de inteligencia artificial*, Olga Lucía Quintero-Montoya, de la Universidad Eafit de Medellín, Colombia, hace una revisión cronológica de los sistemas inteligentes y su gestación en los años sesenta buscando desarrollar estrategias que permitieran entender cómo trabaja el cerebro. Explica la base del razonamiento lógico bajo incertidumbre y el principio de aprendizaje por entrenamiento, el desarrollo de la base de la analítica de datos, el procesamiento de datos e información y el aprendizaje profundo,

principales elementos de los algoritmos inteligentes que permitan el entendimiento de los procesos cognitivos y funcionales del cerebro y que reconozcan objetos y diferencien patrones, ubiquen tendencias y sugieran compras. Finaliza con comentarios sobre los diferentes campos en los que la inteligencia artificial puede ser desarrollada tanto en el mundo como en Colombia.

En el noveno capítulo: *Impacto de cambios tecnológicos en el trabajo: una revisión de la evidencia empírica para América Latina*, Gloria Lizeth Ochoa-Adame y Aldo Josafat Torres-García, de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México, realizan una revisión de análisis recientes sobre el impacto del cambio tecnológico en el mercado laboral en los países de América Latina, y presentan una propuesta metodológica para que los institutos de estadística midan y recuperen datos. Los resultados de la revisión bibliográfica indican distintos efectos en los países latinoamericanos de aplicarse allí la hipótesis planteada para países desarrollados, y muestran que se debe explorar más el impacto del cambio tecnológico en el mercado de trabajo siguiendo la recomendación para el levantamiento de los datos.

Invitamos a leer con atención los planteamientos de los diferentes autores formulados en este libro para comprender los impactos de los profundos cambios tecnológicos que nos afectan en diferentes órdenes.

Edgar Vieira-Posada

Las innovaciones disruptivas: el punto de vista de las humanidades

Jesús Alberto Navas-Sierra

Resumen

El fenómeno global y globalizante de las innovaciones disruptivas suele estudiarse desde una óptica meramente técnica. Pero las innovaciones disruptivas son también un fenómeno cultural que reclama una mirada desde la óptica de las humanidades.

Aunque el fenómeno ‘disruptivo’ no apareció de repente a finales del siglo pasado, se impone inicialmente un escrutinio detallado del pensamiento económico que encapsuló, a modo de credo, el fenómeno disruptivo como una realidad sui generis del más reciente proceso globalizador. Tal análisis aporta la singular paradoja de que el fenómeno disruptivo carecería de un marco teórico válido que permita no solo explicar, sino anticipar su dinámica, al menos a corto o mediano plazo.

Resolver esta aporía es un reto académico inmediato, al menos desde el lado de la economía, la sociología y, por qué no, de la filosofía. Por el momento, los productos y servicios derivados de las innovaciones disruptivas son y seguirán siendo elementos cada vez más imprescindibles para una mayoría creciente de habitantes del planeta. Los emprendimientos empresariales que las hacen y harán factibles continuarán imponiendo un rumbo frenético a la inversión e innovación misma. La fisonomía social y cultural de la humanidad en ciernes apenas empieza a ser intuida.

Palabras clave: capitalismo, ciclo económico, disruptivo, globalización, humanismo

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Navas-Sierra, J. A. (2019). Las innovaciones disruptivas: el punto de vista de las humanidades. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 23-62). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.1>

Disruptive innovations: the Humanities point of view

Jesús Alberto Navas-Sierra

Abstract

The global and globalizing phenomenon of disruptive innovations is usually studied from a purely technical perspective. But disruptive innovations are also a cultural phenomenon that demands a view from the perspective of the Humanities. Although the 'disruptive' phenomenon did not appear suddenly at the end of the last century, a detailed scrutiny of economic thought was initially imposed, which encapsulated, as a creed, the disruptive phenomenon as a *sui generis* reality of the most recent globalizing process. Such analysis provides the singular paradox that the disruptive phenomenon would lack a valid theoretical framework that allows not only explain, but anticipate its dynamics, at least in the short or medium term.

Resolving this aporia is an immediate academic challenge, at least from the side of Economics, Sociology and, why not, Philosophy. For the time being, the products and services derived from disruptive innovations are and will continue to be increasingly essential elements for a growing majority of the world's inhabitants. The entrepreneurial undertakings that make them and will make them feasible will continue to impose a frantic course on investment and innovation itself. The social and cultural face of humanity in the making is just beginning to be intuited.

Keywords: capitalism, economic cycle, disruptive, globalization, Humanism

Lo ‘disruptivo’ y las humanidades

Los siguientes ocho capítulos que conforman el presente libro tratan temas estrictamente técnicos relacionados con las llamadas *innovaciones disruptivas* en un contexto global. Conforme al objeto primordialmente didáctico-divulgativo del libro, resulta de rigor que el editor invitado intente centrar el conjunto de aportes en torno a unos pocos temas que faciliten asimilar la contribución de los diferentes autores.

En virtud del contenido densamente técnico de los capítulos siguientes, al final se optó por privilegiar una visión de las innovaciones disruptivas desde el lado de las humanidades. Antes que un examen del estado del arte del tema, se decidió confrontar el origen, el contenido y el valor instrumental del marco teórico y la metodología predominantes relativos a la cada vez más densa temática de la innovación y la disrupción.

Después de reescribir varios borradores alternativos, se concluyó, todavía provisionalmente, que las llamadas tecnologías disruptivas constituirían, al menos desde el lado de las humanidades, una realidad histórica que ha desbordado el marco teórico dominante que, paradójicamente, aún continúa queriendo explicar, incluso predecir, el más relevante fenómeno económico-social que desde el último cuarto del siglo pasado se manifestó conexas con la actual globalización del planeta.

De ser válida esta conclusión, ella sería una manifestación más de la crisis actual de las humanidades. En el caso de la ‘disrupción’, singularizaría una aparente *aporía* entre realidad y teoría. La primera, dominada por una superestructura científico-técnica —como son las innovaciones disruptivas— cuya dinámica, además de ser cada vez más acelerada, resulta del todo impredecible. La segunda, encasillada en un ‘credo’, a veces con destellos fundamentalistas, impropio para contener todas las manifestaciones del fenómeno disruptivo.

Auge de una conceptualización ‘normativa’

El concepto contemporáneo primero de tecnologías y luego de innovaciones *disruptivas* apareció hace 38 años en la Escuela de Negocios de Harvard (ENH) (Bower

y Christensen, 1995)¹. Esta primera propuesta teórica bien pronto se hizo ‘tendencia’ global, imponiéndose como un imperativo lógico normativo para definir lo que es y no es tecnología o innovación disruptiva. Esta elaboración surgida en Harvard no solo coincidió, sino que además alimentó el primer y voraz *boom* de negocios virtuales y digitales, inicialmente estadounidense.

En virtud de una obligada limitación de espacio y dado que las propuestas teóricas y metodológicas alternativas no conforman un *corpus* igualmente robusto, se optó aquí por centrar la discusión que se desea proponer en torno al marco teórico surgido en la ENH.

Primero, resultaría pertinente aducir que, en un corto lapso, terminológica y semánticamente lo que debió nacer y continuar siendo una ‘especie’ —las *disruptivas*— se convirtió en un ‘género’, rompiéndose así la jerarquía lógica implícita. Por ello, sin que haya sido el objeto de la propuesta teórica de la ENH, gracias a la rápida popularidad que alcanzó el concepto, se hizo usual denominar como *disruptivo* a cada producto, servicio, marca, proceso y hasta actividad humana —incluidas las ideologías, las creencias religiosas o las prácticas sexuales— que pasen por ‘pioneros’, ‘inusuales’ o meramente ‘novedosos’.

Esta trasmutación polisémica² continúa a la fecha motivando equívocos en la teoría y la praxis de la *disrupción*. Por tratarse de un marco teórico no resiliente, la dinámica innovadora globalizada continúa propagándose globalmente sin ser lo suficientemente entendida e incluso manejable. Paradójicamente, forzando un símil kantiano, lo *disruptivo* —singularizado en la nueva cadena de valor que nace— existe y opera en sí y por sí mismo al estilo de un verdadero ‘imperativo categórico’³. Como se detallará más adelante, lo que subsiste es un concepto binario y tautológico, meramente ‘normativo’: lo que es o no es una innovación *disruptiva*.

1 Este artículo seminal fue firmado por Joseph Bower como autor principal, entonces una eminencia gris en la ENH y quien actuó como presidente del comité de tesis doctoral de C. Christensen, quien obtuvo allí su doctorado en 1995. Dos años más tarde, C. Christensen (1997) sistematizó en un nuevo libro el concepto inicial de las *disruptivas*. A partir de entonces, se hizo usual dar prioridad a Christensen sobre Bower en la cita bibliográfica de este primer texto en el que aquel apenas fue su segundo autor (Raynor, 2014).

2 El fenómeno aparece como incidental, dado el énfasis pragmático que regula todo lo referente a la *disrupción*. Como dinámica semántica, curiosamente tiene una extraña similitud con lo acontecido en el campo de la biogenética animal (Torretti, 2010; Marcos, 2015).

3 Kant (1991 [2007], pp. 414-415). Evidente en muchos sentidos, se estaría aquí forzando este concepto primigenio kantiano pensado como un componente de la ética de la existencia y comportamiento humanos.

De todas formas, hubo un antes y un después en la propuesta teórica de las *disruptivas* nacida en la ENH en 1995. Tres años antes, C. Christensen había incurrido en el tema. En 1992, su tesis para optar al grado de Doctor of Business Administration en la Harvard Business School (HBS) se centró en el desafío innovador tomando como caso el ciclo tecnológico de la industria de los discos duros para computadoras (Christensen, 1992a)⁴. Entonces, no habló de tecnologías ni de innovaciones disruptivas y optó por la taxonomía de R. Henderson y K. Clark (1990), la primera también doctorada en la ENH y profesora del vecino Massachusetts Institute of Technology (MIT), y el segundo entonces profesor de la misma ENH y quien tres años antes había publicado un trabajo también seminal sobre el tema.

Esta clasificación, que aún continúa usándose, entrecruza el indicador ‘grado de impacto’ de la tecnología (operacionalizado en dos valores: ‘cambio’ o ‘mero refuerzo’), de lo que resultan cuatro tipos de innovaciones: ‘incremental’, ‘modular’, ‘arquitectural’ o ‘radical’⁵. En el mismo año, C. Christensen continuó con el tema en un nuevo artículo que publicó en dos partes y que fue galardonado un año antes⁶. Tomando nuevamente el caso de la industria de los discos duros para computadores, su interés se mantuvo en el estudio de la dinámica de las innovaciones tecnológicas (inversiones en ingeniería para mejorar las prestaciones de un producto en el tiempo). Dijo que tal dinámica tecnológica y de mercado obedecía a una función marginalmente decreciente —tipo ‘curva-S’— (Christensen, 1992b y 1992c), patrón que desde antes era sintomático del ‘ciclo de vida tecnológica’⁷ (Anderson y Tushman, 1990; Henderson, 1994).

Sin que se pudiera hablar de un ‘salto preparadigmático’ como tal en dicha teorización según lo propuesto por Karl Popper (1953) o Thomas S. Kuhn (1962), tres años después C. Christensen apareció como coautor del trabajo seminal que acuñó el denominativo *disruptivas* (Bower y Christensen, 1995). En este nuevo texto, se redujo la clasificación de R. Henderson y K. Clark a una dicotomía tautológica que se mantiene a la fecha. Luego de un repaso ligero de la historia de las tecnologías modernas, se supuso de modo simple que a partir de un cierto momento habían irrumpido algunas tecnologías que debían tener nombre propio y se llamaron *disruptivas* (*disruptive technologies*). Históricamente, se podía también verificar que

4 Al año siguiente, C. Christensen (1993) publicó una síntesis de su trabajo doctoral.

5 Contra lo que podría pensarse tras el auge de la teoría de las tecnologías disruptivas, la taxonomía de Henderson y Clark continuó siendo aplicada (Coccia, 2006; Hager, 2006).

6 En 1991 recibió el William Abernathy Award como el mejor trabajo en gestión de tecnología.

7 En términos generales, suele representarse como una función continua y derivable con uno o varios puntos de inflexión pasando de cóncava a convexa. Cuando se estanca o decrece, el límite de la función no necesariamente es o tiende a cero.

antes de su aparición existieron, y continuaban existiendo, tecnologías o innovaciones meramente ‘sustentadoras’, si acaso funcionales y apenas transformadoras (*sustaining technologies*).

Dentro de este modelo dicotómico hipersimplificador —como se anticipó, también tautológico⁸—, estas últimas tecnologías se diferenciaban de las primeras en su objeto, pues no se dirigían a mutar sustancialmente el estado, la composición o la dinámica de la cadena de valor preexistente en un mercado concreto. Adicionalmente, estas eran apetecidas por segmentos tradicionales y selectivos del mercado y generaban una mayor rentabilidad dado el alto precio que se pagaba por ellas. Por el contrario, las *disruptivas* nacían en un mercado marginal, producían una relativa rentabilidad, maduraban lentamente antes de imponerse y no siempre lograban sustituir a las *sustentadoras*.

Dos años después de publicado el texto anterior, en su nuevo libro *The Innovator's Dilemma* Christensen (1997) explicó a través de ‘casos icónicos’⁹ el papel que jugaba una tecnología disruptiva en un mercado específico. Este nuevo aporte —que tardó dos años en despegar— fue luego ampliamente alabado¹⁰. En él se utilizó un discurso *ad contrarium*, una vez más dicotómico y tautológico. Conforme al ‘principio rector’ del argumento de base, se ofrecieron criterios adicionales que permitirían a académicos, empresarios y consultores del área discernir cuándo sí

8 Se usa el concepto ‘tautología binaria’ (también ‘dicotómica’) en el sentido de proposición contradictoria y autoexcluyente definida por Aristóteles y correspondiente a la expresión sintáctica $si \{A \text{ es } x\} \rightarrow \{A \text{ no es } no-x\}$: si la tecnología-innovación es ‘sustentadora’, no es o no puede ser ‘disruptiva’ y viceversa (equivaldría a decir: ‘si no es negro, es blanco; es blanco luego no es negro’ y viceversa). El uso de proposiciones tautológicas es común en la formación clásica de universidades como Harvard, donde precisamente Charles S. Peirce desarrolló (en 1869) su tratado lógico y su gran aporte, el ‘diagrama de verdad’, para descubrir tautologías.

9 De nuevo resulta forzoso referirse a Charles S. Peirce: el poder del ícono como ejemplo emblemático de un fenómeno o experiencia históricamente verificable; esto es, como símbolo que enmarca un pensamiento dialógico (Oostra, 2003) y que manifiesta continuidad temporal (Zalamea, 2012, p. 71).

10 Se aduce que ello ocurrió en 1999 cuando C. Christensen apareció junto a Andy Grove, CEO de Intel, en una portada de *Forbes* titulada *Andy Grove's Big Thinker*, luego de lo cual vendió 500 000 copias del citado *Dilemma*; esto coincidió con el inicio del *boom* de las *dot.com* en Silicon Valley. El *Dilemma* y su autor fueron aclamados por líderes empresariales del nivel de Malcolm Gladwell, Michael Bloomberg y Steve Jobs.

y cuándo no se trataba de una innovación disruptiva¹¹. Una encuesta rápida sobre otros casos emblemáticos de éxito o fracaso empresarial-innovativo remitía a la curiosa paradoja de que a menudo algunas empresas habían fracasado no exactamente porque sus ejecutivos hubieran tomado malas decisiones, sino por todo lo contrario: porque habían perpetuado las mismas políticas, especialmente tecnológicas, que por décadas habían hecho exitosas a dichas empresas.

Para demostrarlo, C. Christensen repasó ejemplos muy conocidos de corporaciones que, tras gozar de una posición dominante en el mercado mundial (producto, marca, tecnología, clientela, servicio, etc.)¹², habían sido relegadas e incluso obligadas a liquidarse por ser incapaces de escuchar, oportuna y adecuadamente, las necesidades y pretensiones del mercado.

Pero también podían haber fracasado por no haberse anticipado al mercado despertando tales necesidades. En cualquier caso, por múltiples razones (rigidez burocrática, arrogancia institucional, mala planeación, visión a corto plazo, sistema de costeo, I&D de cubículo, etc.), estas empresas habrían optado por quedarse ancladas en una posición sustentadora o ‘conservadora’ dentro del segmento de mercado que ellas dominaban. Tales corporativos, la mayoría multinacionales en el lenguaje de entonces, permitieron que otras empresas emergentes, con bajos recursos y una cuota baja de mercado, pero con audacia y ambición suficientes, copasen tal vacío de expectativas y, en su caso, creasen y ampliaran tales demandas. Para ello, estas empresas emergentes habrían posicionado nuevas e interactivas ‘propuestas’ (‘proposiciones’ o ‘cualidades’), disruptiendo las ‘cadenas’ de valor preexistentes (*value propositions*, *value networks*).

Como había sido anticipado originalmente (Bower y Christensen, 1995), en este nuevo aporte C. Christensen reafirmó el núcleo (*core*) conceptual de lo *disruptivo*, al que reasignó una doble condición finalista: ‘ruptura-destrucción’; ‘muerte-fracaso’ por un lado, como a la vez ‘reinicio-construcción’- ‘vida-éxito’ por otro lado. Asemejados a las polaridades taoístas del *yin-yang*, las llamadas innovaciones ‘sustentadoras’, según los casos analizados, serían el lado pasivo empresarial o incapaz de sustentar en el tiempo una cadena de valor, en tanto que las disruptivas

11 Una vez más, se asume aquí la presencia de los postulados de C. S. Peirce, quien desde el lado lógico definió el ‘argumento’ como una secuencia de premisas verdaderas que admitidas como verdaderas generan conclusiones con alta probabilidad de ser verdaderas. Lo virtual o subyacente en dichas premisas bases lo denominó ‘principio rector’ (Peirce, 1867; Buchler, 1955, p. 129; Marafioti, 2004, p. 111).

12 Entre muchas: IBM (Mega *hard drive* vs. discos portátiles); Sears (crédito al consumo vs. precios basados en descuentos); Blackberry y Nokia (teléfonos celulares con sistemas operativos cerrados vs. Oi abiertos); Sony (radio de transistores vs. radio de tubo); Bucyrus-Erie excavación mecánica vs. hidráulica); U.S. Steel (siderúrgica vs. minifactorías o molinillos).

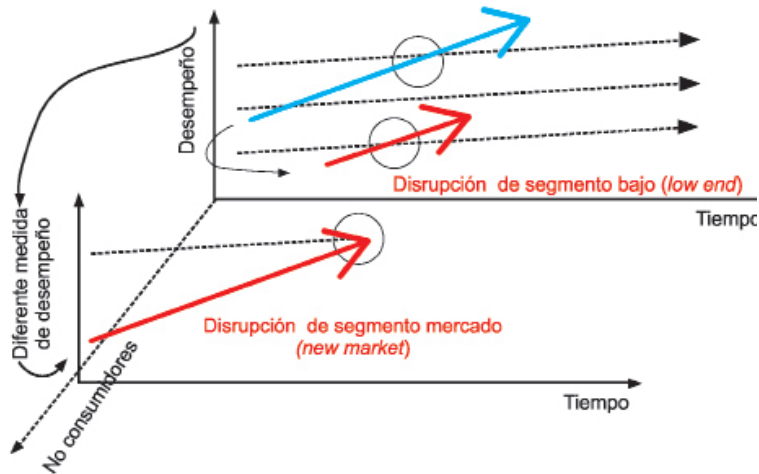
serían el polo activo encarnado en cada nueva dinámica de valor que penetra y se impone en el mercado.

Tres años más tarde, junto a Mark W. Johnson y Darrell K. Rigby (2002a), aportaron una primera batería de identificadores (cinco *tests*) para diseñar auténticos negocios disruptivos. Tomando como caso guía a Xerox-Hewlett-Packard (impresoras de inyección), concluyeron que eran pocas las empresas que lograban resolver acertadamente las varias ‘asimetrías’ entre oferentes y demandantes de innovaciones, por lo que sus innovaciones seguían siendo del tipo ‘sustentadoras’. La efectiva y rentable implantación de una innovación disruptiva se basaba en tres factores (Robles, 2015): recursos (tecnológicos, humanos y financieros), procesos (planificación estratégica y desarrollo de productos) y valores (prioridades). El mismo año, C. Christensen, M. Verlinden y G. Westerman (2002) discutieron cuándo resultaba competitivo la integración vertical y el *outsourcing*.

Al año siguiente, animado por el auge de sus anteriores aportes, C. Christensen, en asocio con M. Raynor (2003),¹³ amplió sus aportes anteriores. Como novedad, se prefirió hablar de *innovaciones* en vez de *tecnologías* disruptivas, suplantación terminológica desde entonces dominante. En esta ocasión (Christensen y Raynor, 2003, pp. 31 y ss), se ofreció una nueva batería de nueve preguntas claves (*black box* o ‘caja negra’), con las cuales, una vez más siguiendo el ‘método de casos’ —tan icónico a la ENH—, un empresario podría autovalorarse como innovador, así fuera marginal o preinstalado en el mercado. Tal ‘caja negra’ servía también a otro tipo de empresarios para generar estrategias disruptivas exitosas.

El gráfico entonces utilizado (Figura 1) aparentaba una relación tridimensional que mostraba la interacción positiva y lineal entre las variables ‘tiempo’ y ‘desempeño’; esta última como sinónimo de prestaciones que satisfacían las necesidades de los usuarios. En él aparecía la génesis típica de una innovación *disruptiva* que surgía y se desarrollaba en nichos de mercado nuevos y marginales, y cuyos clientes-objetivo eran inicialmente pocos o selectos —bajo perfil o gama baja: *lower-end*— (Christensen, 1997, pp. 139 y ss), pero que paso a paso, durante el lapso de su implantación, llegaban a copar mayoritariamente la demanda de las prestaciones ofrecidas en su respectiva cadena de valor.

13 El canadiense Michael E. Raynor se doctoró también en la HBS en el 2000. Como en el caso de C. Christensen, Joseph Bower fue su director de tesis, con quien publicó por primera vez en la *Harvard Business Review*. Además de un centenar de artículos, lanzó *The Strategy Paradox* en febrero del 2007, *The Innovator's Manifesto* en agosto del 2011 y *The Three Rules: How Exceptional Companies Think* en mayo del 2013. Actualmente es director de Deloitte Services LP.

Figura 1. Estrategias sustentadoras (en mercados establecidos)

Fuente: Motamedi (2015)

Repetiéndose en los conceptos iniciales, estas *disruptivas* coexistían con otras innovaciones ya existentes (*sustentadoras*) y que eran demandadas por un segmento numeroso y exigente de usuarios, generalmente habituados o necesitados de la cadena valor ofrecida (*high-end*). Las *disruptivas* operaban a costos bajos y reportaban rendimientos marginales a sus titulares, a la vez que ofrecían a sus usuarios un acceso fácil (*affordability*) a precio bajo, aportándoles a la vez satisfacción-cualidades (*performance: qualities*) no antes ofertadas. Las *sustentadoras* exigían una mayor infraestructura operativa y generaban costos altos, pero garantizaban a su titular maximizar los beneficios derivados de los altos precios que pagaban sus selectos usuarios y exigentes demandantes, por lo general dominantes en el respectivo segmento de mercado (Motamedi, 2015)¹⁴. Estos presupuestos de costo-precio-rendimientos marginales

14 Ejemplificarían el prototipo 'disruptivo' de C. Christensen y R. Raynor los casos de las apuestas innovativas multiescalares de Google y Amazon, y junto a ellas, las iniciativas del multimillonario —y por ahora excéntrico— Elon Musk, que además de la industria automovilística (Tesla), abarcan no menos de otros ocho sectores, siendo los principales: energía (SolarCity), que amenaza con extinguir el sistema convencional de servicios públicos; telecomunicaciones (SpaceX), un 'freeway' a Marte y un Internet totalmente satelital; transporte (Hyperloop) o 'quinto modo de transporte'; túneles (Boring Co.), excavaciones de gran escala a costo mínimo en largura y anchura; salud (Neuralink), interfaces cerebrales, medicamentos y prótesis nanométricos; IA (Open IA), máquinas más seguras y controlables de autoaprendizaje. El sistema operativo Linux, la suite Open Office, AirBnB o Uber lo serían de la primera categoría (CBInsights, 2018a; Veiga, 2016).

utilizados por ambos autores se asemejaban a los utilizados 61 años antes por J. A. Schumpeter, como se analizará luego (Ciborowski, 2016).

Como se verá en detalle, esta nueva modelación teórica de la ENH no planteó expresamente que la ortogénesis de las innovaciones *disruptivas* implicase que estas terminarían sustituyendo a las *sustentadoras*. Conceptual y gráficamente, ambas realidades fueron tratadas teóricamente como entidades separadas y potencialmente coexistentes en el tiempo y el espacio. No obstante, de tomarse en cuenta el reiterado dualismo ‘éxito-fracaso’, no resultaba difícil concluir la posible suplantación de las sustentadoras por las disruptivas. En tal eventualidad, la dinámica de estas últimas concordaría con el modelo de la ‘larga cola’ (*long tail*), cuya mecánica expansiva implica sumar crecientes nichos marginales de mercado para terminar engulléndose hasta la cabeza de este. Tal modelo estratégico habría sido utilizado luego por los gigantes digitales Amazon, Google y Apple, y por las actuales ‘plataformas’ digitales (Andrei y Dumea 2010; Gao 2015).

Tal sería la dinámica del anunciado apocalipsis del comercio minorista que empezó por afectar a los sectores editorial, multimedia (cine en salas) y de fotografía analógica¹⁵, que fueron reyes del mercado global por tantos años. Últimamente, lo sería de un sin número de cadenas de ventas al detal¹⁶. La aparición y formación de nuevos gigantes digitales (Netflix y Bitcoin, entre miles más), e incluso la supervivencia equimarginal de muy pocos de esos antiguos actores dominantes de mercado, ha sido posible gracias al uso de herramientas como las DLT (cadenas de bloques) con las que se repite el mismo proceso de aparición e imposición de un buen número de innovaciones disruptivas¹⁷: segmentos minoritarios de usuarios capaces —más que dispuestos— a pagar precios altísimos por los productos o servicios originales que logran mantenerse en nichos marginales del mercado. Esta última situación, además de ratificar la existencia y función de ambos tipos de innovaciones, mostraría un inesperado fenómeno que aún no ha sido considerado por la doctrina de la ENH: la inversión, trasmutación si se quiere, de una innovación ‘sustentadora’ en una seudoinnovación disruptiva que pasa de ser dominante a marginal en el mercado respectivo y que

15 Kodak y Polaroid, que fueron rápidamente sepultadas primero por las cada vez más potentes cámaras de los actuales *smartphones* (Anderson, 2006, pp. 52 y ss).

16 En su orden, Ingram Books, Dalton & Waldenbooks, Barnes & Noble, Borders, Crown y Books-A-Million frente a Amazon (Piscitelli, 2001, pp. 119, 123 y ss).

17 Entre ellos, Target, Nike y Adidas (CBInsight, 2018d).

continúa satisfaciendo una cadena de valor ahora más sofisticada y en su caso mucho más cara¹⁸.

Un año después, C. Christensen, en asociación con Anthony D. Scott y Erik A. Roth (2004), amplió los aportes anteriores. Estos supusieron que los cientos de miles de seguidores del *Dilema* y su *Solución* apenas habían entendido cómo y para qué diseñar modelos estáticos disruptivos. Para superar este *bias* neutro, se incluyó un engorroso digesto que podía ser usado a modo de batería instrumental para diseñar modelos *disruptivos* que pudiesen ser replicados en diferentes contextos. Con base en ellos, se trataba ya no de responder, sino de imaginar y anticiparse a las eventuales demandas del mercado con innovaciones que desatasen cadenas de valor mucho más complejas.

Para lograr lo anterior, se añadieron nuevos argumentos ontológicos sobre la disrupción. En primer lugar, esta debía ser entendida no como un proceso o evento final, sino como el resultado de una estrategia de ingeniería o mercadeo. Además, la disrupción debía aceptarse siempre como un fenómeno relativo; esto es, que no fuera obligatoria y esencial para permanecer en el mercado. En tercer lugar, la disrupción era un proceso desagregable, por lo que podía darse en cualquier segmento —alto, medio o bajo— del espectro innovativo involucrado. Finalmente, la disrupción era, en buen número de casos, un concepto y un proceso relativo, pues optar por una opción disruptiva o ‘sustentadora’ dependía de los objetivos de cada empresa y la posición pretendida en el mercado.

Por otra parte, se enfatizó que las empresas bien posicionadas en un mercado solían diseñar estrategias basadas en innovaciones ‘sustentadoras’ antes que ‘disruptivas’. Concordando tácitamente con J. A. Schumpeter, se supuso que la estructura de los mercados de todo el mundo tendía a ser de tipo ‘competencia monopolística’¹⁹. Con las tecnologías ‘sustentadoras’, se buscaba hacer más difícil a los competidores la diferenciación del producto, aunque con ellas se corría el riesgo de sobreatender (*overshooting*) a los selectos usuarios sin lograr incrementar su posición en el mercado (*low end*). Con estas innovaciones, tales empresas buscaban

18 Tal sería el caso de las sofisticadas cámaras fotográficas analógicas de Leica, Hasseblad, Mamiya y Nikon (Cannon acaba de retirarse definitivamente del mercado japonés y mundial), cuyos precios, pero también sus prestaciones, pueden exceder en tres y hasta en cinco veces las de sus competidores digitales. Aquí cabría también hablar de la aparición de innovaciones híbridas que se mantendrían en el lado de las ‘sustentadoras’, como serían las cámaras réflex digitales (Nikon, Cannon, Nikon, Cannon y similares) que simulan ser analógicas.

19 Entendida como un tipo de competencia imperfecta en la que existen muchos, o pocos, oferentes de productos similares que se poseen en el mercado a través de varias y a veces sutiles diferenciaciones (prestaciones, calidad, aspecto exterior, precio, servicio técnico, en particular). Los principales electrodomésticos, automóviles y *smartphones* son bien representativos de este tipo de competencia y mercado.

acentuar la integración vertical y la modularidad productiva-comercial terminando por simplificar, e incluso eliminar, elementos no esenciales en la cadena de valor.

Por otra parte, los citados autores incluyeron —antes que un tercer tipo de innovaciones— una característica que podía asemejarse a cualquiera de las dos del binomio clásico, a la cual llamaron innovación ‘desplazante’ (*displacing innovation*). Esta afectaba un punto no necesariamente crítico de una cadena de valor. Cuando ocurría fuera de ella, la innovación era ‘radical’ o ‘incremental’ (*radical innovation*). La ‘desplazante’ era meramente sustentadora y la ‘radical’ era típicamente disruptiva. Los recursos disponibles, las motivaciones y las habilidades determinarían que una empresa desarrollara innovaciones de uno u otro tipo.

También, se añadieron al binomio clásico atributos tales como ventaja (*convenience*), simplicidad, personalización o accesibilidad, todos ellos propios de las innovaciones *disruptivas*. Ahora bien, repitiendo el inicial sesgo tautológico original, C. Christensen y sus colegas advirtieron que las estrategias de innovación eran básicamente de dos tipos: *deliberadas* (estructuradas en pasos, objetivos y una hoja de ruta metódica para su implementación) o *emergentes* (basadas en la ‘voz’ del mercado objetivo siendo flexible su implementación paso a paso). Una y otra exigían una adecuada disciplina financiera²⁰.

Finalmente, apoyados siempre en el método de casos, este apéndice teórico de C. Christensen y coautores pretendió aportar un esbozo metodológico del que aún carecía la doctrina disruptiva de la ENH. Se adujo que si bien la teoría y los datos debían ir juntos, debía privilegiarse la primera. Esto porque de todas formas los datos solo representaban el pasado y no el futuro, siendo uno de los papeles de la teoría el guiar la recopilación de datos conforme a las circunstancias e indicadores disponibles. Tal pauta permitiría enfrentar las batallas competitivas, cuyo éxito rara vez se podía preanunciar exclusivamente con base en los datos disponibles. Por ello, contar antes con un marco teórico robusto daba mayor garantía a este respecto.

Un atajo al vacío metodológico

Once años después de su primera contribución y cuatro antes de la profusa crítica de J. Lepore, C. Christensen (2006), con el concurso de sus alumnos, se abocó a explicar el método que había seguido —y que todos sus seguidores debían seguir— en la elaboración teórica y la investigación empírica de la disrupción innovativa.

20 De hecho, C. Christensen y sus colegas no aportaron nada nuevo en este tema, tratado con profundidad desde los años ochenta y noventa cuando Christensen empezó a publicar al respecto (Mahajan, Muller y Mass 1990; Ulrich y Ellison, 1999).

Basado en un ya viejo modelo de lógica-científica, habló de dos fases: ‘descriptiva’ y ‘normativa’. Dentro de la primera debían transitarse tres pasos: la observación (dirigida a observar, describir y medir los fenómenos), la clasificación (nexos y tipologías) y el modelaje (*set* de asociaciones).

Dentro de un doble esquema piramidal, C. Christensen singularizó el conocido ‘vaivén’ inducción-deducción como apto para acceder a la fase normativa o de modelaje de hipótesis revisables —mediante secuencias de ‘ensayo-error— y conducentes a determinar una asociación —antes que causalidad— entre los fenómenos —hechos o eventos— observables, que en su momento solo podían dar por resultado una innovación, sustentadora o disruptiva. Esta última a su vez reflejada en la tautología destrucción-creación. Lograda esta fase, el modelo quedaba apto para hacer ‘predicciones’: cada vez que sucedieran los eventos ya tipificados, se estaba en presencia de una innovación, sustentadora o disruptiva. Siguiendo los presupuestos de K. Popper (1953 y 1967, pp. 2, 42 y 75), la validez de la predicción (falseabilidad) era significativo sobre el 67 % de casos de acierto.

Pese a la aparente sofisticación, gráfica en particular, utilizada por C. Christensen, antes que una refundación metodológica de su teoría original, su nuevo texto resultó ser una reiteración de esta, que ya para entonces estaba siendo desbordada por una dinámica global propulsada por inusitadas modalidades disruptivas que definitivamente no cabían en el modelo primigenio de la ENH.

Resulta oportuno anticiparse a un apartado de la crítica que J. Lepore formularía ocho años después a las fallas metodológicas de la teoría de C. Christensen (a la que se aducirá más adelante). J. Lepore no solo ignoró el anterior aporte metodológico, además obvió plantear un debate académico más productivo relativo a este crucial asunto. Tal debate tendría que ver con el fundamento y la vigencia del ‘método de casos’ que desde 1927 inspiró el modelo académico de la ENH y que a imagen y semejanza han seguido a pie firme sus homólogos de todo el mundo. Resulta igualmente curioso que, al responder a la mencionada crítica, C. Christensen tampoco hubiera reivindicado esta metodología como eje de sus aportes teóricos, máxime cuando el manejo de casos constituyó el corazón de las asignaturas del doctorado cursado en dicha Escuela²¹.

Desde 1908 cuando el decano de la Facultad de Derecho de Harvard, Edwin E. Gay, introdujo el ‘método de casos’, este se convirtió en el núcleo pedagógico de la formación jurídica de profesionales orientados a ‘resolver problemas’ mediante ejercicios de simulación de roles que los alumnos debían aprender a interpretar

21 Durante poco más de dos años, los alumnos del MBA de la ENH deben resolver no menos de quinientos casos.

para desarrollar una deseada capacidad decisoria. Desde su trasplante a la ENH por su primer decano, Wallace Donham, hacia finales de 1920, el ‘método de casos’ se convirtió en el eje guía de los cursos dictados en ella. Además, la producción y venta de casos pasó a ser una fuente relevante de los ingresos de la Escuela.

A pesar de las reservas que tuvo el ‘método’ desde sus inicios, este ha resistido todas las críticas hechas para su rediseño conceptual y pedagógico. Tales llamamientos empezaron en la Gran Depresión, cuando cundió la desazón sobre el futuro del sistema capitalista (Bridgman, Cummings y McLaughlin, 2016). No obstante, luego de la llegada a la ENH en los años treinta del filósofo, físico y teólogo británico Alfred North Whitehead, el ‘método’ tuvo un nuevo aliento. Bajo su inspiración, la Escuela adoptó una vocación más pragmática que abstracta, la cual imponía aprender a decodificar valores y realidades sociales emergentes a partir de hechos concretos, estimándose que era una falacia pensar en el mundo de los negocios abstraído del resto de la sociedad.

El exitoso modelo teórico de C. Christensen y colaboradores sobre las disruptivas habría sido una adaptación forzada de la filosofía del conocimiento de A. N. Whitehead. Su único aporte metodológico (Christensen, 2006) muestra estar basado en el principio básico de la ‘agrupación de acontecimientos’ (*grouping occasions*), postulado por A. N. Whitehead. Este presupuesto teórico implicaba una forma singular de operacionalizar el método científico inductivo aplicable a las ciencias sociales. Dado que la realidad exterior —mundo perceptible con objeto de conocimiento— era siempre discontinua y fraccionada a la vista del observador crítico, el investigador no tenía otra opción que tomar aquellos hechos, eventos o acontecimientos investigables (*datum*) que *a priori* le resultasen significativos conforme a unos preconceptos (premisas: *impulsos teóricos*) predefinidos por este. Le correspondía luego agruparlos según características comunes (*nexus*) y con base en las intrarrelaciones obtenidas se podía pasar a formular (inferir) las generalizaciones lógicamente posibles. Tal ejercicio repetido (replicación) en varios contextos y momentos permitía al investigador confirmar, refinar o rechazar las primeras generalizaciones, allegando finalmente las que debían formar el núcleo de su teoría. Tratándose de acontecimientos del pasado, estas generalizaciones así alcanzadas permitían convertir el pasado en presente e incluso proyectarlo al futuro —*passage*; predicción: *continuo extensivo*— (Whitehead, 1917a, p. 61; Mead, 1931, p. 1; Whitehead, 1917b, pp. 105, 111 y 191; Whitehead, 1937[1967], p. 201).

Sin embargo, pese la vinculación tan estrecha de A. N. Whitehead con la ENH, su influencia no fue la única en modelar su modelo pedagógico. Para una universidad como Harvard acostumbrada a nutrirse de sí misma, desde finales del siglo XIX había acunado, entre otros cientos más, los trabajos de lógica científica del ya citado filósofo de la ciencia C. S. Peirce, quien precedió a Whitehead en

Harvard²². Ambos influyeron en rechazar el deductivismo cartesiano y en exaltar el inductivismo empírico como base del moderno método científico, incluso en las humanidades (Brioschi, 2012-2013). Por lo mismo, C. S. Peirce privilegió la primacía del estudio del caso (*case*) para deducir normativamente, a partir de una colección de observaciones fiables —cuya cantidad era apenas relevante—, lo general o colectivo (*rule*). Para este académico, el método inductivo no implicaba causalidad sino probabilidad de acierto en el ejercicio de aplicar lo inferido de lo particular a lo general. En especial, cada vez que ese marco teórico se aplicara a cada nuevo caso observable en el futuro, que era lo que al final interesaba. No acertar en una predicción sobre un porcentaje aceptable de error (no inferior a 1/3) era un acierto predictivo válido y una confirmación de lo antes deducido normativamente. Inducción era lo ‘actualmente operacional’ (medible) y no lo necesariamente o fatalmente cierto (Peirce, 1902, pp. II, 321-II, 322).

No parece haber sido otro el ejercicio teórico-metodológico realizado por C. Christensen y colaboradores durante veinte años para afianzar su modelo de las innovaciones disruptivas. Suele decirse que son pocas las teorías de negocios (no más de dos) cuyas predicciones han sido sometidas a una prueba estadística de margen de error y niveles de confianza. Las predicciones realizadas por el mismo C. Christensen sobre poco más de veinte mil casos (supuesto un margen de error del 33 %) mostrarían que este estuvo equivocado en siete mil casos, entre ellos los de iPhone²³, Tesla y Ralph Lauren (Thurston, 2014).

Alternativamente, dicho modelo ha sido sometido a prueba por más de mil gerentes corporativos y estudiantes de escuelas de negocios de Estados Unidos (incluidas las de Harvard y el MIT), quienes efectuaron algo más de ocho mil observaciones. Las ‘predicciones ciegas’²⁴ efectuadas por ellos sobre casos de negocios reales antes de su inversión en el curso arrojaron 35 % de acierto predictivo de éxito respecto al 65 % de fracaso, margen que casi se duplicó en las evaluaciones realizadas luego de concluido el respectivo curso.

22 Muy densa fue la influencia filosófica de C. S. Peirce en Harvard. En 1872 creó el Cambridge Metaphysical Club, donde convergió el interés y el trabajo de un selecto grupo de profesores de dicho claustro.

23 Entonces Christensen afirmó: “[Una] predicción [basada en] la teoría [de la disrupción] sería que Apple no tendrá éxito con el iPhone. Han lanzado una innovación que los jugadores existentes en la industria están muy motivados para derrotar: no es [realmente] disruptiva. La historia habla bastante claro sobre eso y la probabilidad de éxito va a ser limitada” (Webster, 2015).

24 Se trata de un método de pronóstico usado preferentemente en las ciencias geológicas y medioambientales, en el que cada pronóstico se convierte en un regresor para obtener la siguiente predicción. En principio, se trata de fenómenos que se presuponen relacionados al azar, y el desorden y sus resultados implican ‘asociación’ antes que ‘causalidad’.

Otras evaluaciones independientes que abarcaron más de veinte mil predicciones, igualmente ciegas, arrojaron 66 % de acierto y supuesto un 99 % de margen de confianza. Modelos alternativos de evaluación de disrupción confirmaron veinte mil casos con un margen de acierto del 66 % y supuesto un nivel de confianza del 99 % (Von Hippel, 1976, 1982 y 2002; Von Hippel y Jong, 2010).

No obstante, al menos en dos ocasiones la principal crítica formulada por J. Lepore (a reseñarse más adelante) ha puesto en duda los criterios de validez de dichas pruebas de acierto/fracaso en las aludidas predicciones. Se ha dicho que predecir sobre ‘casos’ ya cumplidos —cuya cronología de éxito/fracaso puede reconstruirse al detalle— carece de todo valor predictivo; no así cuando se aplica el modelo y método sobre proyectos de empresas diseñadas como disruptivas o en su caso tratándose de desarrollos propuestos como innovadores (*startups*, por ejemplo).

La ‘destrucción creativa’ vs. el ‘éxito-fracaso’

Suele decirse con frecuencia que el enfoque teórico de los trabajos de C. Christensen desde 1992 estuvieron fundamentados en el postulado de la ‘destrucción creativa’ de J. A. Schumpeter de 1942, el cual, como ha sido analizado, relaciona solo tangencialmente la innovación tecnológica con el fracaso-éxito empresarial, aunque sí con la perenne vitalidad del capitalismo preglobal (Palmer, 2011).

No parece que C. Christensen hubiera querido nutrirse de un aporte teórico que nunca usó explícitamente, pues solo en algunos de sus trabajos ulteriores aparece una referencia bibliográfica al citado autor austríaco²⁵. De cualquier forma, la conceptualización disruptiva de C. Christensen sus seguidores la relacionan como un esfuerzo de revivir este postulado clásico de la macroeconomía del siglo pasado.

En la teorización dominante de la ENH, no existe un intento primario de re-explicar la dinámica del neocapitalismo de finales del siglo xx y menos aún de refundar las bases del mercado globalizado, como sí lo hizo J. A. Schumpeter con el capitalismo decimonónico. Aunque ambas teorías emergieron desde el llamado ‘lado de la oferta’ (producción/empresario) y no desde el ‘lado de la demanda’

25 En uno de sus libros, se remite a la economía de Taiwán como fruto de la ‘creación destructiva’ de J. A. Schumpeter (Christensen, Scott y Roth, 2004). En otro libro en el que firma como coautor (Dyer, Gregersen y Christensen, 2011, p. 265), aparece una ligera alusión a la referida teoría. Curiosamente, en un reciente y meramente divulgativo aporte salido de la ENH, C. Christensen, quien aparece como segundo autor, se puso la etiqueta *Schumpeter’s Heirs: How Innovation Can Spur Development* (Mezue, Christensen y Van Bever, 2015).

(mercado/consumo), la perspectiva de J. A. Schumpeter es esencialmente macroeconómica en tanto que la de C. Christensen es por excelencia microeconómica.

La teoría schumpeteriana descartó de plano la platónica competencia perfecta de los ‘clásicos’ y se centró en la imperante competencia monopolística/oligopolística del capitalismo avanzado, como lo predijo K. Marx (Elliott, 1980). Para J. A. Schumpeter, la experiencia histórica mostraba que la incesante dinámica del capitalismo se alimentaba del gen de la ‘destrucción creativa’ a modo de decodificador del ADN de un sistema de producción económico propiamente occidental. No era el comportamiento del sistema de precios, ni los ciclos o las fluctuaciones monetarias, ni el aumento de la población o el capital, ni siquiera las guerras, lo que determinaba la supervivencia arrogante del capitalismo. Antes bien, era la acción y la capacidad de innovación del empresario demiúrgico —ya no el burgués apolíneo— que de tanto en tanto, entonces en periodos largos y no tan cortos como lo son hoy en día, lograba destruir y renovar creativamente el orden macroeconómico mediante nuevos bienes de consumo, métodos de producción, organización interna, transporte y mercados ampliados (Schumpeter, 1942 [2003], pp. 81-86 y 131; Ciborowski, 2016; Diamond, 2006; Andersen, Dahl, Lundvall y Reichstein, 2006).

Por su parte, como lo señaló la crítica de J. Lepore, la tesis disruptiva de C. Christensen era, antes que una teoría en sí, una fórmula por excelencia de naturaleza escatológica que facilitaba operacionalizar la capacidad de una empresa de permanecer activa y dominante en el mercado —no morir—, lo cual lograba controlar con base en una tecnología introducida previamente. Según dicha crítica, la teoría de C. Christensen y la ENH se había impuesto como una batería conceptual y un método corporativo capaz de guiar su sobrevivencia (éxito) o, en su defecto, su fracaso en el mercado. Paradójicamente, tal seudoparadigma teórico no buscó definir ni medir la capacidad de ‘disruptir’ de una empresa o sus competidores, sino de mejorar o saber generar lealtades en el mercado manteniendo, o en su caso incrementando, el volumen y el margen de rentabilidad mediante innovaciones ‘sustentadoras’.

De modo implícito, la teoría de C. Christensen aparentaba concordar con el teorema schumpeteriano que hizo de la competencia la clave de oro del mercado capitalista, siempre abierto a innovaciones que *ex visu* desafiaban y terminaban disruptiendo una posición dominante de empresas ‘dueñas’ de una cuota relevante del mercado. La respuesta exitosa a una amenaza disruptiva a estas empresas casi siempre obedecía a mejoras en la innovación preexistente. El fracaso no obedecía propiamente a la conformación de un proceso de destrucción creativa, sino simplemente a un relevo que podía significar el entierro (muerte) de la firma incapaz de competir como antes lo hacía.

Pero a su turno, el éxito inicial de una innovación disruptiva no significaba a corto o a mediano plazo una respuesta ‘sustentadora’ de la firma amenazada. Por un tiempo, hasta tanto la disruptiva no amenazase con hacerse dominante, se trataría de una mera coexistencia competitiva; cada firma con su propio segmento de mercado: unas pocas, grandes y rentables corporaciones gestoras de innovaciones ‘sustentadoras’ y un sin número de estallidos irruptores —cuasi-guerrillas respecto a potentes ejércitos—, de las cuales no más del 10-15 % resultaban exitosas comercialmente (Christensen y Raynor, 2003, p. 69; Christensen, 2006; Christensen, Raynor y McDonald, 2015; Schumpeter, 1942[2003], p. 83), y esto en el caso de las llamadas ‘empresas unicornio’ solía ser de apenas el 1 % (CBInsights, 2018b).

Es en este último punto en el que J. A. Schumpeter y C. Christensen coincidirían al exigir que el proceso exitoso de introducción de innovaciones en el mercado tenía que ser visto a largo plazo. Esto último, por cuanto las circunstancias internas o externas, visibles o invisibles a la empresa innovadora eran múltiples, complejas, aleatorias y sobre todo impredecibles a corto y a mediano plazo.

Aunque ambos autores utilizaron un método casuístico y microhistórico para hacer inferencias generalizadoras, los dos difieren en el modo de hacerlo. Cinco años después de su primera formulación de la destrucción creativa, J. A. Schumpeter (1947) presentó una perspectiva histórica de cómo era y funcionaba el proceso de ‘respuesta creativa’²⁶. Se trataba de un proceso único, finalmente exitoso a nivel de las economías nacionales en que este tuviese lugar.

A su vez, aunque también relacionada con un sector económico específico, en la dicotomía tautológica de innovación ‘sustentadora’ y ‘disruptiva’ de C. Christensen aparecían como dos dominios autónomos y separados tanto teórica como empíricamente. No siendo tangentes, ni se enlazaban ni convergían en ningún momento de ambos planos y, por lo mismo, no podían visualizarse momentos de ruptura y relevo de uno por otro tipo de innovación; lo que sí acontecía en los presupuestos de la destrucción creativa. Como ya se adujo, solo al comienzo C. Christensen (1992 a y b) se interesó por el modelo de la ‘curva en S’ para explicar el ciclo de vida de las que entonces llamó ‘tecnologías’ a secas (Overall y Wise, 2015). En el resto de sus trabajos, dejó entrever dos procesos puramente lineales, de tendencias positivas y paralelas.

26 Tres son sus características: 1) es impredecible *ex ante*; 2) es siempre un producto a largo plazo; 3) su éxito o fracaso dependen fundamentalmente del *quatum* y la *qualitas* de las personas disponibles en el complejo empresarial y de emprendimiento.

Por su parte, para J. A. Schumpeter la curva de vida del proceso innovativo es siempre, caso por caso, una función discreta que se manifestaba en dos momentos: la ‘invención’ —que era la simiente aportada por la ciencia— y la ‘innovación’ como tal, que era el uso y la aplicación que uno o varios empresarios daban a la invención original, transformándola en nuevos productos y servicios. Sin embargo, la secuencia temporal entre invención e innovación no era continua ni contigua. La primera podía interesar a unos y no a otros, y la aplicación que hiciera cada cual de ella podía no ser coincidente ni en el tiempo ni en el espacio. Además, el éxito o el fracaso de la innovación igualmente variaban en el tiempo y en el espacio. Cada proceso innovativo era un ‘conjunto’ y ‘subconjuntos’ de componentes. Al final, uno o pocos empresarios se apropiarían, directamente o mediante alianzas —procesos de ‘absorción’ o ‘fusión’ como impera hoy—, de una innovación que hacían costeable y rentable alcanzando una posición dominante en el mercado.

Según Schumpeter y sus colaboradores, esta visión secuencial y a largo plazo hacía posible hablar de un ‘ciclo de vida’ de la innovación respectiva. La elaboración reciente y más acabada de todos los modelos gráfico-matemáticos de los ‘ciclos de vida’ (producto, empresa, innovación, innovador) es el *hype cycle* o ‘ciclo de expectación’ que fue propuesto por Jackie Fenn en 1995, cuando C. Christensen empezó a hablar de disruptivas, y que fue popularizado por la consultora estadounidense Gartner para la que Fenn trabaja desde 1994²⁷.

Finalmente, al no ser un modelo macroeconómico, el formato de C. Christensen no permite conectar con los recurrentes ciclos económicos dentro de los cuales puede emerger una innovación disruptiva. No sucede así con los postulados de J. A. Schumpeter, para quien una fase de depresión económica suele coincidir con el agotamiento de innovaciones largamente dominantes y poco rentables —reflejado en las quiebras del caso—, así como la fase de recuperación-auge suele mostrar la aparición masiva de nuevos empresarios (*fixers*) capaces de implantar novedosos

27 Suele decirse que el *hype cycle* fue la implementación de Roy Amara, quien fue presidente del Institute for the Future y quien a modo de teorema de la incertidumbre planteó que “tenemos a sobrestimar los efectos de la tecnología a corto plazo y a subestimarlos a largo plazo”. También se dice que esta fue una actualización de las llamadas ‘ondas de Kondratiev’ o ciclos largos (47 a sesenta años), planteadas por el entonces economista soviético. Mediante una curva sinusoidal, se podía reflejar el nexo entre las grandes recesiones económicas y la emergencia de tecnologías de ruptura que sobredimensionaban los mercados financieros. Estos eran la causa de las ‘burbujas’ que cíclicamente explotaban y daban paso a depresiones económicas y conflictos sociales. La consultora Gartner publica anualmente un *hype cycle* mostrando la evolución de las tecnologías emergentes por cada industria según los tres tipos de riesgo que estas arrastrarían. Tales elaboraciones se dicen inspiradas en las tesis de los ciclos (siete a diez años) de J. A. Schumpeter (1939).

inventos e innovaciones que reimpulsan el ciclo expansionista. El caso más emblemático para Schumpeter fue la sustitución del sistema de transporte de personas y cargas de la ‘diligencia’ por el ferrocarril²⁸, así como el reemplazo del barco de vela por navíos a vapor lo fue para otros.

¿El derrumbe de una teoría o de un método?

De hecho, el aporte teórico de Christensen y el predominio conceptual de la ENH sobre las innovaciones *disruptivas* se mantuvieron prácticamente intocados por casi veinte años. No obstante, pese el sólido éxito editorial, académico y corporativo del que gozaba tal credo, cinco años después de su primera formulación bien pudo haberse empezado a cuestionar su validez. El 10 de marzo del 2000, con el aval —y la supuesta asesoría— de Christensen, se lanzó el Disruptive Growth Fund (Fondo de Crecimiento Disruptivo) que estuvo dirigido por Neil Eisner, un reconocido corredor bursátil de St. Louis.

Como era de esperarse, los 3,8 millones de dólares del capital inicial del fondo se centraron en iniciativas de reconocible capacidad disruptiva y, por consiguiente, de predecible éxito financiero. Antes de un año, el fondo dejó de operar sin merecer un funeral honroso, pues había perdido el 64 % de su capital. Curiosamente, el nacimiento del fondo había coincidido con el fin de la llamada *orgía.com* durante la cual, en un solo mes (marzo a abril del 2000), el índice Nasdaq cayó 40 % obligando al cierre de 150 empresas, descalabro que en pocos meses alcanzaría el 71 % de caída, causando el cierre de miles de *startups*, justamente las predilectas en la teoría de C. Christensen (Johansen y Sornette, 2000)²⁹.

Si bien este fiasco del ideólogo de las disruptivas pasó pronto desapercibido, a mediados del 2014 Jill Lepore publicó en *The New Yorker* una exhaustiva crítica —de seis mil palabras— a la persona y a las teorías de su colega de universidad,

28 Tal habría sido el caso del primer ferrocarril transcontinental de Estados Unidos, concluido en 1869 después de la larga y dura recesión generada por la Guerra de Secesión estadounidense (Schumpeter, 1939, p. 84; Schumpeter, 1947; Schumpeter, 1967, p. 213; Vieira-Posada, 2011).

29 Aunque C. Christensen se desligó de tal fracaso, siete años después junto a su hijo Matt creó Rose Park Advisors (RPA), que funciona como un fondo de inversión y asesoría. Como lo dice su portal (<https://goo.gl/jzN4rx>), en el fondo se aplica la teoría de la innovación disruptiva al momento de invertir en compañías cuyos modelos de negocios aprovechan oportunidades disruptivas en todas las industrias, geografías, tamaños y escenarios de la empresa. La firma exhibe *links* con la ENH y releva la privilegiada posición académica de C. Christensen en esta. Con igual propósito e inspiración, se han creado innumerables fondos de inversión y capital de riesgo, dentro y fuera de Estados Unidos, muchos de ellos con gran éxito (Barnett, 2016).

que tituló *The Disruption Machine. What the gospel of innovation gets wrong*³⁰. Para muchos, se trató de la más demoledora crítica a la obra y el pensamiento de C. Christensen y por tanto a todo el andamiaje teórico de las tecnologías e innovaciones disruptivas anidadas en la ENH.

J. Lepore había sido ‘asistente de la asistente’ de Michael Porter, quien fue autor de tres *bestsellers* directamente conexos con la futura teoría disruptiva³¹. De hecho, C. Christensen fue el sucesor de M. Porter en la ENH desde 1995 cuando terminó su doctorado en dicha Escuela. Con su singular crítica, J. Lepore rompió el letargo en que habían permanecido los aportes de C. Christensen durante los diez últimos años y quien solo había tratado de complementarla en una sola ocasión³².

Aferrada desde la primera línea a una retórica demoledora, J. Lepore cuestionó radicalmente los supuestos teóricos y metodológicos utilizados y reciclados periódicamente por C. Christensen. Para ello, desde su atalaya de microhistoriadora³³, J. Lepore escrutó y reinterpretó los datos sobre los cuales, desde sus inicios, C.

30 Jill Lepore es también profesora de la Universidad de Harvard donde ocupa desde el 2003 la silla 41 David Woods Kemper en Historia de los Estados Unidos. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Yale y desde el 2005 es columnista de la casi centenaria revista neoyorkina.

31 *Competitive Strategy* (1980), *Competitive Advantage* (1985) y *The Competitive Advantage of Nations* (1990).

32 El último probablemente en junio del 2014 (Christensen y Van Bever, 2014), que fue una reescritura de un artículo de C. Christensen publicado en el 2012 en el *New York Times*. En esta ocasión, el autor propuso un tercer tipo de innovación complementario a las clásicas ‘sustentadoras’ y ‘disruptivas’ que imprecisamente llamó “innovaciones que mejoran el rendimiento” y con las que se reemplazan productos antiguos con modelos nuevos y mejores. Estas innovaciones crean pocos puestos de trabajo, pues sus productos o servicios son sustitutos de los productos preexistentes. Tal sería el caso de Prius, el carro eléctrico de Toyota que suele ser preferido a otros modelos como el Camry de la misma marca.

33 Es la especialización académica por la que se le conoce ampliamente, sobre todo en Estados Unidos. En el 2001, lanzó un ‘manifiesto’ convocando a sus colegas a escribir basados en las cuatro reglas clásicas de la microhistoria (Lepore, 2001). Tres años antes había publicado *The Name of War: King Philip’s War and the Origins of American Identity* (1998), que le valió premios y elogios. En ese libro, Lepore quiso que se escuchara la ‘otra voz’, la de los indios derrotados por los colonos de Nueva Inglaterra en 1765. Un año después, publicó *A is for American: Letters and Other Characters in the Newly United States* (2002), basado en la correspondencia de siete notables estadounidenses en la que intentó descifrar el proceso formativo del ‘habla visible’ aparejado con el nacimiento de la democracia de ese país (Foreman, 2013). Más recientemente, publicó *The Story of America: Essays on Origins* (2012), una reescritura de la historia de Estados Unidos a través de impresos antológicos, desde el relato de John Smith sobre la fundación de Jamestown (1607), hasta el discurso inaugural de Barack Obama (2009).

Christensen había fundamentado su teoría de la disrupción. Concluyó que mediante un modelo de ‘casos a dedo’ había forzado el modelo didáctico original de la ENH, produciendo una distorsión de los hechos —microhistorias amañadas— de la que se había valido para supuestamente sustentar unos pocos, simplistas, cambiantes y ecléticos parámetros de una teoría presentada con pretensiones de verdadero paradigma científico. Con ellos, C. Christensen no solo pretendió explicar, sino que también quiso predecir el rumbo de la revolución tecnológica global. J. Lepore concluyó que al no cumplir con los presupuestos lógico-científicos mínimos, su teoría y su método no explicaban ni podían predecir lo que pretendían, pues carecían de una mínima validez. Como si fuera poco, J. Lepore culpó a C. Christensen por el colapso financiero mundial del 2008 (Raynor, 2014).

De su escrutinio, J. Lepore concluyó que, en la mayoría de los casos, C. Christensen solo había tomado en cuenta eventos coyunturales para decretar casos de éxito o fracaso corporativo, lo cual violaba abiertamente el tercer postulado de su ‘manifiesto’ (2001) —no abundancia de datos relevantes—, por lo que no era factible representar una realidad socioeconómica concreta (disrupción) a base de meras ‘alegorías’. Así, J. Lepore empezó por demoler el ‘caso’ de la IBM y los discos duros como soporte de almacenamiento masivo de datos, preámbulo a la revolución de la información, la comunicación y el conocimiento globales.

Como ya se advirtió, dicho tema había guiado los trabajos iniciales y la tesis doctoral de C. Christensen en la ENH desde 1992. J. Lepore concluyó que de haber estudiado a fondo un historial de 37 años³⁴ de tales innovaciones, C. Christensen habría allegado conclusiones diferentes. Por ejemplo, la cadena de rapidísimas disrupciones que acompañaron la disminución del tamaño-peso (14" a 1,8"), la portabilidad, la capacidad y la velocidad de tales dispositivos del *hardware* computacional, hasta su práctica desaparición con las plataformas de almacenamiento en la nube (*web cloud*). Así, la indagación de C. Christensen no explicaba cómo IBM, la impulsora original de los discos duros tras abandonar la batalla por tales dispositivos, continuaba viva frente al repetido calvario-cementerio de las empresas disruptivas que se habían comprometido con cada nueva innovación³⁵.

J. Lepore se lamentó de que C. Christensen concluyera que cada caso de fracaso corporativo por él estudiado como efecto de una innovación disruptiva triunfante ignorara la existencia de historias paralelas de competencia corporativa vinculadas con esta. A cambio, C. Christensen había optado por bisecar dicha industria caso por caso, considerando como criterio de éxito disruptivo el que

34 Los discos duros fueron inventados por IBM en 1955 y C. Christensen terminó su tesis doctoral en 1992.

35 Entre las más recordadas, Shugart y Seagate.

hubiera sido acometido por una empresa ‘nueva’ cuando parecía evidente que cada éxito-fracaso, así hubiera sido de corta duración, era apenas un eslabón en el ‘hallazgo’ de una nueva cadena de valor. Según J. Lepore, en el caso de los discos duros se trató de dar paso a un sistema de almacenamiento masivo virtual —no físico— en vía de imponerse globalmente³⁶.

Para J. Lepore, el tratamiento y las apresuradas conclusiones teóricas hechas por C. Christensen a partir de este caso habían entronizado un parámetro icónico identificador de disrupción. Este último no se basaba en la naturaleza ‘desplazable’ de la innovación misma, sino en que estuviera vinculada con una empresa y un producto-servicio-proceso nuevos. Según J. Lepore, fue este atajo hipersimplificador lo que determinó que la primigenia teoría de la disrupción —desde el *Dilema* y la *Solución*— se convirtiera en una teoría dicotómica y un atajo tautológico para encasillar fracasos o éxitos corporativos, más aparentes que reales. Como complemento, J. Lepore reprochó a C. Christensen que desde su trabajo original adoptara como criterio de éxito, ciertamente arbitrario, que las empresas disruptivas hubieran obtenido entre 1977 y 1989 más de cincuenta millones de dólares en ingresos a precios constantes de 1987. De hecho, desde 1989 todas las empresas que supuestamente habían ‘disruptado’ a IBM, además de haber obtenido utilidades cien veces superiores, habían tenido una vida fugaz (Micropolis y MiniScribe, por ejemplo).

Más aún, refiriéndose a otro de los casos emblemáticos de C. Christensen, las excavadoras mecánicas versus hidráulicas, J. Lepore añadió que él había introducido desde los inicios otro parámetro todavía más confuso, si no engañoso [*murky*], para caracterizar una innovación como disruptiva. En este análisis, C. Christensen había eludido una vez más realizar un análisis a fondo de la densa microhistoria competitiva-empresarial que involucró la dinámica mundial de tal sector desde 1880 (Catepillar, Hitachi y Demag)³⁷. Aunque no lo dice de modo expreso, J. Lepore censuró a su colega de claustro por haber basado todo su andamiaje conceptual en un *tempus brevis* y en la mayoría de los casos indeterminado y arbitrario. Enfatizó que la dimensión temporal era esencial al método de análisis histórico-corporativo involucrado con las innovaciones disruptivas.

Para J. Lepore, obtener conclusiones acomodando el tiempo del caso estudiado resultaba igualmente un atajo metodológico que invalidaba la teoría implicada. Recalcó que el asunto del *tempus* resultaba mucho más complejo de lo que aparecía en las elaboraciones de C. Christensen y colaboradores. En ellas, se mezclaban tantas líneas del tiempo como casos (empresas-innovaciones) fueran objeto

36 Muy recientemente las Sim de la próxima generación de *smartphones*.

37 Con ocasión de la construcción del Canal de Panamá y que copó otras megaobras de ingeniería civil estadounidenses y mundiales.

de contraste. Una vez más, resultaba facilista —cuando no engañoso— escoger arbitrariamente una ‘fecha’ —*ex visu*— en la que supuestamente acontecía la irrupción de una innovación estrictamente disruptiva. Si bien era cierto que la historia de cada empresa poseía su propia y singular línea de tiempo, el objeto del análisis debía ser el *momentum* (como sinónimo de ‘movimiento’ dentro de un proceso de ‘largo aliento’) en que una innovación dada aparecía, se imponía al final como disruptiva y generaba con ello una nueva realidad histórico-económica y no solo una historia corporativa.

¿Una batalla entre harvardianos?

C. Christensen respondió de inmediato a J. Lepore desde su pedestal de consagrado gurú de una teoría que había iluminado por casi veinte años tanto a académicos como a empresarios e inversionistas, desde Silicon Valley hasta el NYSE. Lo hizo más emocional que académicamente al tildarle de haber roto cánones sagrados académicos —perentorios en la Universidad de Harvard—, pues había querido desacreditarlo de una “[...] manera realmente mala rompiendo con [...] todas las reglas de la academia y me acusó de actuar en forma atroz, verdaderamente atroz”. También dijo que “[...] si ella en vez de fingir hubiera sido realmente una erudita, habría leído sus últimos escritos en los que me había anticipado a reevaluar todo lo que ella le había criticado tan acérrimamente”. Dirigiéndose en un tono patriarcal a su colega, le añadió: “[...] Espero que puedas entender que estoy enojado porque una mujer de tu estatura no podría cometer tan criminal acto de deshonestidad, ni en Harvard ni en cualquier otro lugar” (Bennett, 2014).

Algunos de los que siguieron no tanto el tono como el guion de la disputa entre J. Lepore y C. Christensen la calificaron como una batalla intraclaustró. Revisando la cronología de la crítica de J. Lepore, la reacción de Christensen y de sus áulicos y detractores, todos se basaron en la edición impresa del *New Yorker* que circuló una semana antes a la aparición de la versión digital de la revista³⁸. Este aparente incidente a extramuros, como alguno ha apuntado, revelaba que más allá de un duelo personal entre dos reputados profesores había sido una abierta disputa entre quienes ni compartían, ni ocupaban una misma posición jerárquica en el

38 El texto impreso de J. Lepore apareció en el *New Yorker* del lunes 16/06/2014 y el texto digital, el siguiente lunes 23. La respuesta de C. Christensen la publicó *Bloomberg Businessweek* cinco días después (21/06/2014) de aparecida la versión impresa de J. Lepore. Esta fue la transcripción de una entrevista telefónica que aquel concedió —o pidió— al redactor Drake Bennett (Walters, 2014).

interior del campus³⁹ y quienes, por lo demás, tampoco se habían tratado personalmente antes de iniciada tal polémica.

Ambos protagonistas tuvieron defensores dentro y fuera de Harvard, y en su caso unos y otros atacaron o alabaron el contenido, la forma y el alcance de la crítica de J. Lepore y la respuesta de C. Christensen. Paul Krugman (2014), en su leído blog *The Conscience of a Liberal*, calificó de *excelente* un artículo en el que se:

[...] desacredita la exagerada ‘innovación disruptiva’ como la clave del éxito en los negocios y en todo lo demás [...] es un desmontaje cuidadoso, en el que se revalúan los casos de estudio que supuestamente mostraban la abrumadora importancia de los innovadores advenedizos [‘startups’], y muestra que lo que realmente sucedió no encajaba en el guion propuesto.

Adicionalmente, Krugman censuró a C. Christensen el haberse autoasignado, desde mediados de 1990, la popularidad de la innovación como propia del proceso de desarrollo corporativo, recordándole que él mismo había escrito repetidamente sobre el tema al final de los años setenta (Krugman, 1979).

El mismo día, casi a la misma hora de aparecida la anterior crítica, Andrew Leonard (2014), en el blog *Salon*, se hizo eco de la columna de Krugman con una entrada que tituló *El emperador de la ‘teoría de la interrupción’ no lleva ropa*. Se explicó el enfado de C. Christensen, gurú de Silicon Valley cuyos magnates tecnológicos no están contentos con la despiadada crítica que J. Lepore hizo en contra del *establishment*, en particular de los ñoños (*nerdy guys*) de las *startups* californianas. Añadió que ya no se podía pensar en Christensen y en la ‘disrupción’ de la misma manera después de la leer a J. Lepore.

Un día después, Jonathan Rees (2014), reconocido por sus trabajos críticos sobre el efecto de los cambios tecnológicos a largo plazo en las relaciones laborales

39 La afamada ENH (en inglés *HBS*) nació en 1908 dentro de la Facultad de Artes y Humanidades (FAS) que había sido creada en 1890. En 1913, la Escuela pasó a ser autónoma no solo en su gobierno, sino incluso en su ubicación dentro del campus cuando trasladó su sede al barrio bostoniano de Allston, situado en la orilla opuesta del río Charles que delimita el perímetro de la universidad. Para una Escuela cuyo lema es “*We educated leaders who make difference in the world*”, pronto se hizo común que sus miembros se refirieran al resto de colegas de Harvard como *los de la otra orilla del río*. La Escuela mantuvo su predominio masculino hasta 1965, cuando se admitieron las primeras mujeres para cursar su prestigioso MBA. Por su parte, el Departamento de Historia y Literatura ocupa una posición cada vez menos relevante dentro de la cada menos relevante FAS. En ella, la profesora Jill Lepore aparece como disertante (*lecturer*) en temas de historia estadounidense. C. Christensen no solo goza de una abultada popularidad académica, sino que también es uno de los más apreciados ‘proveedores’ de matrícula y fondos para la HBS.

y funciones de producción —especialmente en la industria siderúrgica y de la refrigeración⁴⁰—, se apuntaló en la crítica de J. Lepore para realzar sus hallazgos relativos al ‘ciclo de vida’ de toda tecnología, cuyas fases de agotamiento y desaparición distaban de las taxativas proposiciones de C. Christensen. Repitió que sus hallazgos mostraban que la trayectoria y la vigencia de una innovación no podían ser reducidas a parámetros meramente de mercado y gestión empresarial, como lo habían hecho la ENH y C. Christensen.

J. Rees añadió que el análisis del éxito y sobrevivencia de una tecnología —como lo había establecido J. A. Schumpeter a comienzos del siglo xx— imponía tomar en cuenta un sin número de variables extracorporativas, tales como las coyunturales, las legales y las políticas, que tanto interna como externamente condicionaban e incluso determinaban una y otra cosa. J. Rees se lamentó de que la elaboración teórica de C. Christensen, además de aparentar apenas historias empresariales muy selectivas, no había tenido en cuenta los aportes fundamentales de los ‘chandlerianos’ o seguidores del ‘historiador de los negocios’ Alfred DuPont Chandler, también destacado miembro de la Universidad de Harvard.

En efecto, en 1962, entonces como investigador en el vecino MIT, A. D. Chandler había realizado un estudio seminal de cuatro casos emblemáticos (Du Pont, General Motors, Standard Oil y Sears Roebuck), con los que demostró cómo las historias de las grandes corporaciones estadounidenses estuvieron marcadas por una acomodación gradual y coherente entre sus estructuras organizacionales multidivisionales (en forma de ‘M’) y sus estrategias de negocios. Dentro de dicho proceso de ajuste, la innovación creativa había sido un factor clave, no el único, de competencia y sobrevivencia de estas corporaciones en sus respectivos mercados (Chandler, 1962, p. 283)⁴¹.

40 *Managing the Mills: Labor Policy in the American Steel Industry during the Nonunion Era* (2003) y *Refrigeration Nation* (2013).

41 Ha sido muy vasta la bibliografía pionera de A. Chandler relativa al tema en mención, en especial: *Giant Enterprise: Ford, General Motors, and the Automobile Industry. Sources and Readings* (1964); “Anthracite Coal and the Beginnings of the Industrial Revolution in the United States” (*Business History Review* vol. 46, núm. 2 (1972), pp. 141-181); *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business* (1977). Como miembro de Harvard, en coautoría con Herman Daems, publicó: *Managerial Hierarchies: Comparative Perspectives on the Rise of the Modern Industrial Enterprise* (1980); *The Coming of Managerial Capitalism: A Casebook on the History of American Economic Institutions* (1985). En 1990, con el aporte de Takashi Hikino, publicó: *Scale and Scope: The Dynamics of Industrial Capitalism*, en el que recorrió la historia de seiscientas firmas de Estados Unidos, Reino Unido y Alemania durante tres cuartos del siglo xx. En 1998, en asocio con Peter Hagström y Örjan Sölvell, coeditó: *The Dynamic Firm: The Role of Technology, Strategy, Organization, and Regions*; y más recientemente, *Inventing the Electronic Century: The Epic Story of the Consumer Electronics and Computer Industries* (2001).

Emulando la metáfora de A. Smith, A. D. Chandler encontró que desde mediados del siglo XIX la gerencia moderna que surgió a la par con la gran empresa era la nueva ‘mano visible’ que había sido capaz de revolucionar las macroestructuras económicas a través de nuevas y audaces innovaciones tecnológicas. Sin hablar de tecnologías o innovaciones *disruptivas*, A. D. Chandler estudió la revolución económica que, entre otros, había jugado el ferrocarril desde antes de la segunda mitad del siglo XIX en la emergencia de un nuevo orden económico mundial, innovación que fue tan disruptiva como ha llegado a serlo Internet para la conformación del actual orden global desde finales de los años noventa.

Igual que sus antecesores, bien habría podido J. Rees reprochar a C. Christensen no haber tenido en cuenta otros estudios pioneros sobre las innovaciones tecnológicas, como los promovidos en la misma ENH por Donald R. Schoen (1969) desde finales de los años sesenta. Entre sus hallazgos aparecieron como inseparables las variables de innovación tecnológica y de toma de decisiones estratégicas dentro de las corporaciones estadounidenses (Kantrow, 1980).

Diez días después de J. Rees, el británico Haydn Shaughnessy (2014), asesor y consultor en innovación global, tras leer el artículo de J. Lepore se preguntó por qué había hecho aguas la teoría del gurú de la innovación disruptiva. En un inserto en el blog de *Forbes*, H. Shaughnessy estimó que un debate irrumpido en la ENH, uno de los más conspicuos epicentros de la élite mundial de los negocios, hacía ineludible un cuestionamiento del paradigma ya obsoleto de la innovación disruptiva de C. Christensen y colaboradores. H. Shaughnessy (2016) se lamentó que C. Christensen no se hubiera interesado nunca en algunas de sus recientes propuestas (2018) que apuntaban al uso de ‘ecosistemas’ y ‘plataformas’ como modelos de negocios globales dotados de una capacidad para encriptar clústeres de innovaciones disruptivas.

Más allá de la postura emocional, antes que académica, de C. Christensen al tildar de ‘criminal’ la vehemencia y contundencia del texto de J. Lepore, H. Shaughnessy reconoció que esta había planteado elementos claves para repensar el preparadigma disruptivo; esto es, la disrupción como una visión cosmológica sustitutiva del progreso y sinónimo de un poder capaz de revertir poco a poco el orden económico preexistente, efecto que solía reconocerse tardíamente.

Basado en la crítica de Lepore, Shaughnessy dio por buena la revisión que ella hizo de los casos de *us Steel* y *Seagate*, y su conclusión en cuanto a que una innovación disruptiva no conllevaba necesariamente la muerte del ‘disruptido’ por el ‘disruptor’. Por ello, estimó que en realidad la ENH no había aportado nada nuevo teóricamente, pues en los casos vistos en vez de disrupción como tal se hablaba de una mera ‘adaptación’ o ‘transformación’ corporativa y del mercado. *Contrario sensu*, al igual que Lepore, Shaughnessy concordó que la disrupción implicaba la

sustitución gradual —y en un comienzo hasta subestimada, si no despreciada— de productos-servicios, marcas o empresas y que al final se creaban con ellas mercados de dimensión y dinámica insospechadas. Consecuentemente, la innovación disruptiva resurgía como una versión modernizada del ‘ciclo de vida empresarial’ basada en los presupuestos teóricos de la ya aludida ‘destrucción creativa’ de J. A. Schumpeter, a últimas del ‘ciclo de vida del producto’ (Audretsch y Thurik, 2003; Klepper, 1996).

Como si no fueran ya hartos los olvidos y vacíos de C. Christensen, H. Shaughnessy recordó a este los aportes pioneros de Steven Klepper (Carnegie Mellon University-CMU), creador del ‘evolucionismo empresarial-innovador’ (Agarwal y Braguinsky, 2015). Entre los muchos aportes de S. Klepper, figuraba precisamente la indagación sobre el ‘ciclo de vida empresarial’ y la dinámica oligopólica vigente ya antes del precapitalismo global. Añadió que bajo tal perspectiva, las empresas dominantes ‘mataban’ o bien mejoraban e incluso resucitaban el talento y las tecnologías de las empresas que compraban o con las que se fusionaban, con el propósito de limpiar el mercado de una competencia o una innovación indeseada (Klepper y Simons 1997; Klepper y Simons 2000; Klepper 2002); proceso tan de moda en el mundo de las *startups* actuales y sobre las que repetidamente ironizó J. Lepore.

Cinco días antes de la contribución de J. Shaughnessy, Christopher Newfield, profesor de Estudios Americanos en la Universidad de California (Santa Bárbara) y estudioso de la historia universitaria estadounidense, comentó en extenso la crítica de J. Lepore con el título *Christensen’s Disruptive Innovation after the Lepore Critique*, en la que se refirió a las ya comentadas de Krugman y Rees. C. Newfield inició su aporte preguntándose si la innovación debía ‘disrumpir’ todo para que la sociedad tuviese cosas nuevas y mejores. Al autorresponderse, entendió la airada reacción de C. Christensen como una manifestación de la ira generalizada de las clases corporativas y políticas que se habían valido de la teoría de la innovación disruptiva para explicar y justificar el rosario de interminables absorciones y quiebras de empresas durante los últimos treinta años. Concordó con J. Lepore que quienes se declaraban escépticos de dicho credo eran tildados con enojo como opositores perdedores y acusados de *fauvismo* (*fogyismo*)⁴².

Como lo habían hecho los críticos anteriores, C. Newfield propuso situar el aporte crítico de J. Lepore en un contexto sociocultural antes que exclusivamente

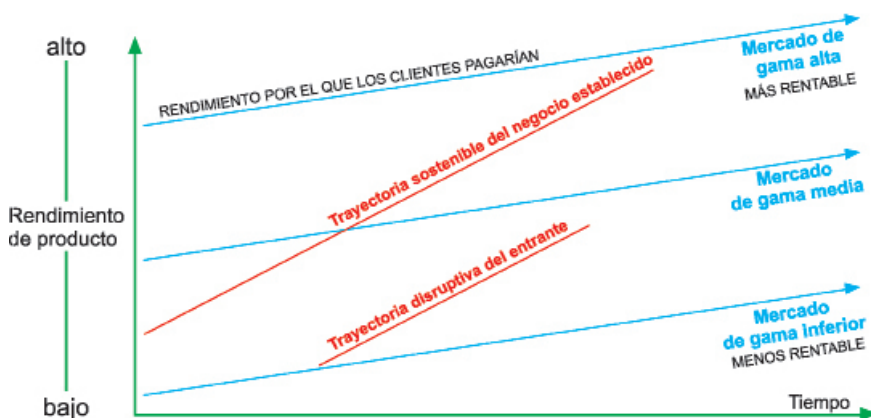
42 Entendido el apelativo por analogía con la expresión creada por el crítico de arte Louis Vauxcelles, quien llamó *fauves* (fieras) a un grupo de artistas (entre ellos P. Gauguin, H. Matisse, A. Marquet, A. Derain, M. De Vlaminck y K. Melevitch), quienes en el Salón de Otoño de París de 1905 habían colgado pinturas sin una propuesta artística reconocida y cuyo lema era “rebeldía contra todo”.

gerencial. Planteó que la teoría de la innovación disruptiva debía reformularse después de veinte años de entronizada, pues tenía que ser retomada no como una mera teoría de un cierto tipo de innovación, sino como una teoría de la gobernabilidad global. En su criterio, la innovación disruptiva debía servir para explicar cómo los empresarios ofrecían productos y servicios nuevos que, además de estar disponibles en menor tiempo, incluían mejoras en casi todo y eran hasta más baratos. Todo lo anterior casi siempre afectando —y en su caso destruyendo— las estructurales sociales y culturales en que estas pululaban. Por ello, los políticos debían controlar y fomentar las instituciones —ecosistemas— innovadores.

La ‘recaptura del estado del arte’

Al año siguiente de la acérrima crítica de J. Lepore, C. Christensen, en asocio con Bryan Mezue y Derek van Bever (2015), hizo un intento de reescribir el núcleo (*core*) de su teoría de la innovación disruptiva. Basados en una nueva representación gráfica, reflejaron el ‘modelo’ actualizado de tal marco teórico. En el diagrama adjunto, utilizado en dicha ocasión, se representó la variación del ‘rendimiento del producto’ (*performance*) según una escala continua bajo a alto a lo largo del tiempo. Las flechas rojas reflejan en paralelo el comportamiento de dos tipos de negocios según la innovación de base, los establecidos (innovación ‘sustentadora’) y los emergentes (innovación disruptiva). Aunque no se muestra, de hecho, el gráfico supone dos ejes verticales más (lado derecho) que miden, simultáneamente y en paralelo al rendimiento del producto o servicio, la ‘gama’ del mercado (baja a alta) y la rentabilidad de cada tipo de innovación (flechas azules).

Figura 2. El modelo de innovación disruptiva



Fuente: Christensen, Raymor y McDonald (2015)

Las funciones de cada curva son todas de tendencia lineal y tal cual se muestran no tienen límite matemático específico. Como lo refleja la gráfica, curiosamente se validó una de las críticas de J. Lepore sobre el supuesto mal uso y hasta abuso que C. Christensen había hecho de su teoría de la innovación disruptiva. En esta ocasión, los citados autores manifestaron que esta podría seguir siendo víctima de su propio éxito, en especial por quienes la habían utilizado e incluso criticado sin siquiera haberla leído. Se afirmó que:

A pesar de su extensa difusión, los conceptos fundamentales de la teoría se han malinterpretado en numerosas ocasiones al igual que sus principios básicos se han aplicado de manera equivocada. Además, los ajustes y mejoras esenciales de la teoría durante los últimos 20 años parecen haberse visto eclipsados por la popularidad de su formulación inicial.

Ciertamente, resultó extraño que C. Christensen y sus cercanos colaboradores de vieja data no se hubieran preguntado qué tan disruptivo había sido su cuasiparadigma teórico-metodológico después de veintidós años. Antes bien, reafirmaron, incluso casi que hipersimplificaron, buena parte de sus postulados clásicos. En primer lugar, no solo se mantuvo la dicotomía entre innovaciones ‘sustentadoras’ y disruptivas, sino que también se agudizaron todas las tautologías implícitas entre una y otra, en particular los presupuestos relativos a la segmentación del mercado, las prestaciones (*performance*) del producto o servicio y la rentabilidad derivada de cada especie de innovación. Una vez más, C. Christensen excluyó de entrada una gama muy variada de otras opciones innovativas desechando aportes teórico-metodológicos nuevos y enriquecedores del andamiaje teórico supérstite.

Al año siguiente, C. Christensen, en unión a Taddy Hall, David S. Duncan y Karen Dillon (2016), publicó: *Competing against Luck: The Story of Innovation and Customer Choice*⁴³. Con esta nueva contribución, se propusieron llenar algunos de los vacíos que, al parecer de sus autores, subsistían en la teoría y el método de las innovaciones ‘sustentadoras’ y disruptivas. Para las empresas no ancladas en el ‘presente’, se ofreció un método para evitar hacer del análisis de la innovación un juego de azar, para lo cual se ofreció una herramienta dirigida a desarrollar productos y servicios apetecibles por los clientes que estaban dispuestos a pagar un precio superior por ellos.

Tal actitud debía acompañar a quienes decidieran asumir el riesgo de diseñar y poner en ejecución dicha estrategia. Esta convicción les imponía a estos descartar al cliente como objetivo primordial de la innovación. Se afirmó entonces que los clientes no compraban productos o servicios; de hecho, los ‘contrataban’ como

43 Christensen et al. (2016).

algo derivado de un modo de ‘hacer’ o ‘producir’ algo (*job*). Por ello, tratar de involucrar a un cliente abstracto o imaginado en una estrategia de innovación no garantizaba su éxito. Por lo mismo, la clave estaba en conocer y entender primero lo que los clientes hacían o podían hacer con dicha innovación. El enfoque de los ‘trabajos por hacer’ (*jobs-to-be-done*), o ‘teoría del uso innovativo’, era lo que había guiado a empresas de crecimiento rápido y autosustentado (*startups*) como Amazon, Intuit, Uber, Airbnb y el yogur Chobani natural, entre otras. Tales éxitos permitían predecir otros más. A fin de cuentas, este último aporte de C. Christensen y asociados se presentó como un nuevo esfuerzo para terminar de entronizar como predictiva la teoría de las innovaciones disruptivas nacida en la ENH.

¿Una sociedad posdisruptiva?

Por fuera de existir o no un *corpus* teórico y metodológico que válidamente logre explicar y predecir el futuro del mundo de la innovación disruptiva, lo cierto es que el *corpus* teórico nacido e impuesto en la ENH continúa siendo el credo dominante que guía —así ya no ilumine— la formación de empresarios, ingenieros, académicos, asesores corporativos y políticos en Estados Unidos,⁴⁴ Europa y Japón (Denning, 2015; Selhofer, René y Markus, 2012; Chen, Yin y Mei, 2018; Nogami da Costa y Rodríguez-Veloso, 2017; Ghandi, 2013; Diplock y Wheatland, 2016).

Más allá de los presupuestos dominantes que definen el fenómeno como volátil, incierto y complejo (*vic*)⁴⁵, los recientes esfuerzos para encontrar un nuevo y más funcional marco teórico para las *disruptivas* estarían fundamentados en al menos dos consensos preparadigmáticos, en el sentido de T. Kuhn (1962, pp. 20, 47, 67 y 72; Chen, Yin y Mei, 2018). En primer lugar, la dinámica disruptiva es y será, además de exponencial y globalizante, más y más impredecible. En segundo lugar, toda afectación disruptiva es y será irreversible, por lo que la vida individual y el orden socioeconómico nunca más volverán a ser los mismos.

Como hace setenta años lo predijo Norbert Wiener (1948), al cierre de este capítulo (octubre del 2018), en virtud de las insospechadas cadenas de valor que aún quedan y quedarán por irrumpir con cada nueva innovación disruptiva, el ‘futuro ya se hizo presente’. Por ello, para nada resulta aventurado preguntarse si el *homo sapiens* está a puertas de un nuevo salto evolutivo ya no genético, sino cultural. Este nuevo horizonte estaría dominado por la ahora llamada ‘metainteligencia’ (Diamandis, 2006), surgida de las diferentes manifestaciones de la actual inteligencia

44 En 1940, cuatro mil alumnos obtenían su MBA; este año serán 170 000 (CBInsights, 2018c).

45 En inglés, *vUCA*: *volatile, uncertain, complex* (Deloitte University, 2017).

artificial y para algunos, una de sus herramientas cuya constante sofisticación es más aún imprevisible.

¿Los hombres de fe de cualquiera de las religiones del planeta tendrían pues que autointerrogarse si esta impredecible sociedad poshumana será un *novus ordo seclorum* sin Dios o cualquier otra forma de divinidad? (Harari, 2014). ¿Más concretamente, si la metainteligencia cibernética terminaría de hacer y poner en marcha lo que Dios dejó de hacer después de concluida la creación? (Harari, 2016). Igualmente, ¿sería válido que tales creyentes se preguntaran si ese nuevo orden será planetario o exoplanetario? ¿Ese orden sería al fin la reposición del paraíso terrenal perdido y prometido a los hombres que sobrevivan hasta entonces?, o ¿será un nuevo e igualmente impensable infierno terrenal?

A quienes no les interesan estas premuras confesionales y prefieran situarse en la onda de la biopolítica, y suponiendo que en dicha sociedad poshumana los actuales seres humanos cohabitarían con *cyborgs*, *avatars* y demás entidades posgénero, sería igualmente consecuente que se preguntaran si en dicho nuevo orden habría espacio para que surja un pos o transhumanismo superior al que surgió en la Grecia clásica o en el Extremo Oriente hace casi tres mil años. Más concretamente, ¿brotará un haz de iluminación generador de los valores y las reglas para un orden planetario definitivo e irreversiblemente justo, equitativo y pacífico? (Sloterdijk, 2000).

Sin duda, estos mínimos interrogantes deberían continuar siendo temas imposterables de las humanidades de este comienzo de siglo (Vásquez, 2016). Tal propósito pasa por el reto de repensar los actuales currículos de las carreras humanísticas (Staton, 2012).

Referencias

- Agarwal, R. y Braguinsky, R. (2015). Industry Evolution and Entrepreneurship: Steven Klepper's Contributions to Industrial Organization, Strategy, Technological Change, and Entrepreneurship. *Strategic Entrepreneurship Journal*, (9), 380-397.
- Andersen, E. S., Dahl, M. S., Lundvall, B.-Å. y Reichstein, T. (2006). *Schumpeter's Process of Creative Destruction and the Scandinavian Systems: A Tale of Two Effects*. Ponencia presentada en DRUID Conference on Knowledge, Innovation and Competitiveness, Copenhagen.
- Anderson, C. (2006). *The Long Tail: Why the Future of Business is Selling Less of More*. Westport: Hyperion e-books.

- Anderson, P. y Tushman, M. L. (1990). Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model of Technological Change. *Administrative Science Quarterly*, 35(4), 604-633.
- Andrei, A. G. y Dumea, A. (2010). Economics of Long Tail, A Challenge for Branding. *The Annals of the "Ștefan cel Mare" University of Suceava*, (10), 210-216.
- Audretsch, D. B. y Thurik, A. R. (2003). Entrepreneurship, Industry Evolution and Economic Growth. *Austrian Economics and Entrepreneurial Studies. Advances in Austrian Economics*, 6, 39-53
- Barnett, C. (2016). The Disruption of Venture Capital. *Startupgrind*. Recuperado el 3 de octubre del 2018, de <https://goo.gl/2oX8xM>
- Bennett, D. (2014). Clayton Christensen Responds to New Yorker Takedown of 'Disruptive Innovation'. *Bloomberg*. Recuperado el 3 de julio del 2018, de <https://goo.gl/BMCLU6>
- Bower, J. L. y Christensen, C. M. (1995). Disruptive Technologies: Catching the Wave. *Harvard Business Review*, 75(1).
- Bridgman, T., Cummings, S. y McLaughlin, C. (2016). Restating the Case: How Revisiting the Development of the Case Method can Help us Think Differently About the Future of the Business School. *Academy of Management Learning y Education*, 15(4).
- Brioschi, M. R. (2012-2013). *The problem of novelty according C.S. Peirce and A.N. Whitehead* (tesis doctoral, Università Degli Studi Milano, Milán, Italia).
- Buchler, J. (1955). *Philosophical Writings of Peirce Selected and edited with an introduction by Justus Buchler*. Nueva York: Dover Publications Inc.
- CBInsights (2018a). *From Energy to Transport to Healthcare, Here Are 8 Industries Being Disrupted by Elon Musk and his Companies*. Recuperado el 1 de octubre del 2018, de <https://goo.gl/84nFPw>
- CBInsights (2018b). *Venture Capital Funnel Shows Odds of Becoming a Unicorn Are About 1%*. Recuperado el 23 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/u2N651>
- CBInsights (2018c). *Killing Strategy: The Disruption of Management Consulting May 31*. Recuperado el 22 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/EmqHZY>
- CBInsights (2018d). *Amidst The Retail Apocalypse, Target, Nike, y Adidas Are Using These Local Strategies to Bring Customers in the Door*. Recuperado el 2 de octubre del 2018, de <https://www.cbinsights.com/research/nike-target-adidas-local-stores-trend/>
- Chandler, A. D. (1962). *Strategy and Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise*. Cambridge: The MIT Press.

- Chen, J., Yin, X. y Mei, L. (2018). Holistic Innovation: An Emerging Innovation Paradigm. *International Journal of Innovation Studies*, 2(1), 1-13
- Christensen, C. M. (1992a). *The Innovator's Challenge: Understanding the Influence of Market Environment on Processes of Technology Development in the Rigid Disk Drive Industry*. Cambridge: Harvard University Press.
- Christensen, C. M. (1992b). Exploring the Limits of the Technology S-Curve. Part I: Component Technologies. *Production and Operations Management*, 1(4), 334-351.
- Christensen, C. M. (1992c). Exploring the Limits of the Technology S-Curve. Part II: architectural technologies. *Production and Operations Management*, 1(4), 358-366.
- Christensen, C. M. (1993). The Rigid Disk Drive Industry: A History of Commercial and Technological Turbulence. *The Business History Review*, 67(4), 531-588.
- Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Boston: Harvard Business School Press.
- Christensen, C., Johnson, M. y Rigby, D. (2002). Foundations for Growth: How to Identify and Build Disruptive New Businesses. *MIT Sloan Management Review*, 43(3), 22-31.
- Christensen, C., Verlinden, M. y Westerman, G. (2002). Disruption, Disintegration and the Dissipation of Differentiability. *Industrial and Corporate Change*, 1(5), 955-993.
- Christensen, C. M. y Raynor, M. E. (2003). *The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth*. Boston: Harvard Business Review Press.
- Christensen, C. M., Scott, A. D. y Roth, E. A. (2004). *Seeing What's Next: Using the Theories of Innovation to Predict Industry Change*. Boston: Harvard Business School Press.
- Christensen, C. M. (2006). The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption. *Journal of Product Innovation Management*, (23), 39-55.
- Christensen, C. M., Horn, M. B. y Staker, H. (2013). *Is K-12 Blended Learning Disruptive? An Introduction to the Theory of Hybrids*. Lexington: Clayton Christensen Institute for Disruptive Innovation.
- Christensen, C. M. y Van Bever, D. (2014). The Capitalist's Dilemma. *Harvard Business Review*. Recuperado el 12 de agosto del 2018, de <https://goo.gl/A61uL7>
- Christensen, C. M. y Michelle R. Weise. (2014). *MOOCs' Disruption is Only Beginning*. Recuperado el 13 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/dqk3Ck>
- Christensen, C. M., Raynor, M. y McDonald, R. (2015). What is Disruptive Innovation? *Harvard Business Review*, 93(12), 44-53.

- Christensen, C. M., Hall, T., Dillon, K. y Duncan, D. S. (2016). *Competing against Luck: The Story of Innovation and Customer Choice*. Nueva York: HarperBusiness.
- Ciborowski, R. (2016). Innovation Systems in the Terms of Schumpeterian Creative Destruction. *Eureka: Social and Humanities*, (4), 29-37.
- Coccia, M. (2006). Classifications of Innovations Survey and Future Directions. *Working Paper CERIS-CNR 2/2006*, 8(2).
- Deloitte University (2017). *Your Next Future. Capitalising on Disruptive Change*. Westlake: Deloitte University Press
- Denning, S. (2015, octubre 15). How Useful Is Christensen's Theory of Disruptive Innovation? *Forbes*. Recuperado el 1 de octubre del 2018, de <https://goo.gl/atMEG9>
- Diamandis, P. H. (2016). *Exponential Growth Will Transform Humanity in the Next 30 Years*. Recuperado el 11 de octubre del 2018, de <https://goo.gl/UtPQxu>
- Diamond, Jr., A. M. (2006). Schumpeter's Creative Destruction: A Review of the Evidence. *The Journal of Private Enterprise*, 22(1), 120-146.
- Diplock, T. y Wheatland, J. (2016). Disruptive Technologies: Part 1. *LEK Executive Insights*, 18(29), 1-4
- Dyer, J., Gregersen, H. y Christensen, C. M. (2011). *The Innovator's DNA: Mastering the Fiveskills of Disruptive Innovators*. Boston: Harvard Business Review Press.
- Elliott, J. E. (1980). Marx and Schumpeter on Capitalism's Creative Destruction: A Comparative Restatement. *The Quarterly Journal of Economics*, 95(1), 45-68.
- Foreman, A. (2013). *Jill Lepore and the Microhistory of America*. Recuperado el 2 de octubre del 2018, de <https://goo.gl/Jqgygi>
- Ghandi, A. (2013). Disruptive Innovation. A Reflection on Theory and its Importance in Project Management. Londres: Royal Holloway University of London.
- Gao, L. (2015). *Network Communications and Economics Lab (NCEL)*, 11-30.
- Harari, Y. N. (2014). *Sapiens. De animales a dioses: Una breve historia de la humanidad*. Barcelona: Debate.
- Harari, Y. N. (2016). *Homo Deus. Breve historia del mañana*. Barcelona: Debate.
- Hager, C. (2006). *Determining Degree of Innovation in Business Models by Applying Product Innovation Theory*. Oslo: Center for Entrepreneurship University Of Oslo.
- Henderson, R. (1994). Of Life Cycles Real and Imaginary: The Unexpectedly Long Old Age of Optical Lithograph. *Research Policy*, 24(4), 631-643.

- Henderson, R. M. y Clark, K. B. (1990). Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly (Special Issue: Technology, Organizations, and Innovation)*, 35(1), 9-30.
- Hutt, R. (2016). *What is Disruptive Innovation?* World Economic Forum (WEF), 25 de junio del 2016. Recuperado el 2 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/uQVa7Z>
- Johansen, A. y Sornette, D. (2000). The Nasdaq Crash of April 2000: Yet Another Example of Log-Periodicity in a Speculative Bubble Ending in a Crash. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 17(2), 319-328.
- Kant, E. (1921[2007]). *Fundamentación de la metafísica de las costumbres* (Pedro M. Rosario Barbosa, ed.). Madrid: Creative Commons.
- Kantrow, A. (1980). The Strategy-Technology Connection. *Harvard Business Review*. Recuperado el 13 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/T5kuGm>
- Klepper, S. (1996). Entry, Exit, Growth, and Innovation Over the Product Life Cycle. *American Economic Review*, 86(3), 562-583.
- Klepper, S. (2002). Firm Survival and the Evolution of Oligopoly. *RAND Journal of Economics*, 33(1), 37-61.
- Klepper, S. y Simons, K. L. (1997). Technological Extinctions of Industrial Firms: An Inquiry into Their Nature and Causes. *Industrial and Corporate Change*, 6(6), 379-460.
- Klepper, S. y Simons, K. L. (2000). The Making of an Oligopoly: Firm Survival and Technological Change in the Evolution of the u.s. Tire Industry. *Journal of Political Economy*, 108(4), 728-760.
- Krugman, P. (1979). A Model of Innovation, Technology Transfer, and the World Distribution of Income. *Journal of Political Economy*, 87(2), 253-266.
- Krugman, Paul. (2014, junio 16). Creative Destruction Yada Yada. *New York Times*. Recuperado de <https://goo.gl/Q5hKdd>
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Kurzweil, R. (2012). *La singularidad está cerca. Cuando los humanos transcendamos la biología*. Berlín: Lola Books.
- Leonard, A. (2014, junio 16). The Emperor of “Disruption Theory” is Wearing No Clothes. *Salon*. Recuperado el 14 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/P8Bomt>
- Lepore, J. (1998). *The Name of War: King Philip’s War and the Origins of American Identity*. Nueva York: Vintage.

- Lepore, J. (2001). Historians Who Love Too Much: Reflections on Microhistory and Biography. *The Journal of American History*, 88(1), 129-144.
- Lepore, J. (2002). *A is for American: Letters and Other Characters in the Newly United States*. Nueva York: Vintage.
- Lepore, J. (2014, junio 23). The Disruption Machine. What the Gospel of Innovation Gets Wrong. *The New Yorker*. Recuperado el 5 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/oHJXp7>.
- Mahajan, V., Muller, M. y Mass, F. M. (1990). New Product Difussion Models in Marketing: A Review and Directions for Research. *Journal of Marketing*, (54), 1-26.
- Marafioti, R. (2004). *Charles S. Peirce: El éxtasis de los signos*. Buenos Aires: Editorial Biblos.
- Marcos, A. (2015). Especie. *Diccionario Interdisciplinar Austral*. Recuperado el 12 de septiembre del 2018, de <http://dia.austral.edu.ar/Especie>
- Mead, G. H. (1931). *The Philosophy of the Present*. Londres: The Open Court Company.
- Mezue, B. C., Christensen, C. M. y Van Bever, D. (2015). The Power of Market Creation. *Foreign Affairs*, 94(1).
- Motamedi, S. (2015). *High-End Disruption: Using Affordability to Measure Innovation*. Recuperado el 4 de septiembre del 2018, de <http://tannutuva.org/blog/2015/high-end-disruption>
- Nogami da Costa, V. K. y Rodríguez-Veloso, A. (2017). Disruptive Innovation in Low-Income Contexts: Challenges and State-Of-The-Art National Research in Marketing. *RAI Revista de Administração e Inovação*, 14, 162-167.
- Oostra, A. (2003). *Peirce y los diagramas*. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Overall, J. y Wise, S. (2015). An S-Curve Model of the Start-Up Life Cycle through the Lens of Customer Development. *The Journal of Private Equity*, 18(2), 23-34.
- Palmer, T. G. (Ed.). (2011). *The Morality of Capitalism. What Your Professors Won't Tell You*. Ottawa: Jameson Books Inc.
- Patel, D. A. y Watros, D. R. (2014). *Faculty Grows to Largest Size Ever, Report Shows*. Recuperado el 12 de junio del 2018, de <https://goo.gl/1PWWqb>
- Peels, R., Van Woudenberg, R. y De Ridder, G. J. (2017). Newman and Nussbaum on the Purpose of Higher Education. En: A. Halsema y A. Roothaan (Eds.), *Scheuren in het bolwerk — vrouwen in de filosofie: Artikelen aangeboden aan Dr. Loes Derksen* (pp. 78-86). Ámsterdam: vu-Drukkerij.

- Peirce, C. S. (1867). On the Natural Classification of Arguments. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, (7), 261-287.
- Peirce, C. S. (1902). Pragmatic and Pragmatism. En *Dictionary of Philosophy and Psychology Vol. 2* (pp. 321-322). Nueva York: Macmillan.
- Pichai, S. (2018). *AI at Google: Our Principles AI*. Recuperado el 21 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/YiFCtZ>
- Piscitelli, A. (2001). *La generación Nasdaq: apogeo (¿y derrumbe?) de la economía digital*. Buenos Aires: Ediciones Granica.
- Popper, K. (1953). *Science: Conjectures and Refutations*. Lecture given at Peterhouse, Cambridge Summer. Recuperado el 1 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/me4XdQ>
- Popper, K. (1967). La lógica de la investigación científica. Madrid: Editorial Tecnos.
- Porter, M. E. (2001). Strategy and the Internet. *Harvard Business Review*, (7), 261-287.
- Raynor, M. E. (2014). *Of Waves and Ripples. Disruption Theory's Newest Critic Tries to Make a Splash*. Westlake: Deloitte University Press.
- Rees, J. (2014, junio 17). Disruption Disrupted. *More or Less Bunk*. Recuperado el 1 de octubre del 2018, de <https://goo.gl/Bs2qcM>
- Schoen, D. R. (1969). Managing Technological Innovation. *Harvard Business Review*, 156-168.
- Schumpeter, J. A. (1939). *Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Schumpeter, J. A. (1942[2003]). *Capitalism, Socialism and Democracy*. Londres: Harper Perennial.
- Schumpeter, J. A. (1947). The Creative Response in Economic History. *The Journal of Economic History*, 7(2), 149-159.
- Selhofer, H., René, A. y Markus, M. (2012). Disruptive Innovation: Implications for Competitiveness and Innovation Policy. *INNO-Grips – Global Review of Innovation Policy Studies* N.º 4, pp. 1-86.
- Shaughnessy, H. (2014). *What Did The Innovator's Dilemma Get Wrong?* Recuperado el 20 de junio del 2018, de <https://goo.gl/k6vt1S>
- Shaughnessy, H. (2016). *Platform Disruption Wave: A New Theory of Disruption and the Eclipse of American Power*. Boise: Tru Publishing.

- Shaughnessy, H. (2018). *Why Disruption Is All About Ecosystem Thinking*. Recuperado el 20 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/RFTfnQ>
- Sloterdijk, P. (2000). *Règles pour le parc humain. Suivi de la Domestication de l'être*. París: Mille et Une Nuits
- Staton, M. (2012). *The New Liberal Arts*. Recuperado el 2 de septiembre del 2018, de <https://goo.gl/29PrZs>
- Thurston, T. (2014). *Christensen vs. Lepore: A Matter of Fact*. Recuperado el 12 de septiembre del 2018, de <http://bit.ly/1k7BpRj>
- Torretti, R. (2010). La proliferación de los conceptos de especie en la biología evolucionista. *Theoria*, (69), 325-377.
- Ulrich, K. T. y Ellison, D. J. (1999). Holistic Customer Requirements and the Design-Select Decision. *Management Science*, 45(5), 641-658.
- Vásquez Rocca, A. (2016). Sloterdijk, Habermas y Heidegger. Humanismo, posthumanismo y debate en torno al Parque Humano. *Eikasía. Revista de Filosofía*, 4, 1-22.
- Veiga, A. (2016). *What Is Disruptive Innovation?* Una revisión crítica de la teoría de la innovación disruptiva. *Economía, Sociedad y Empresa. Revista de Negocios del IEEM*, (3), 60-62.
- Vieira-Posada, É. (2011). Interpretaciones y transformaciones tecnológicas en los procesos de globalización. *Papel Político*, 16(2), 667-699.
- Von Hippel, E. (1976). The Dominant Role of Users in the Scientific Instrument Innovation Process. *Research Policy*, 5(3), 212-239.
- Von Hippel, E. (1982). Appropriability of Innovation Benefit as a Predictor of the Source of Innovation. *Research Policy*, (11), 95-115.
- Von Hippel, E. (2002). Open Source Projects as Horizontal Innovation Networks by and for Users. *MIT Sloan Working Paper* N.º 4366-02.
- Von Hippel, E. y De Jong, J. (2010). Open, Distributed and User-Centered: Towards a Paradigm Shift in Innovation Policy. *EIM Research and Policy Reports*.
- Walters, T. (2014, Julio 18). *Is Jill Lepore's Critique of Disruption Theory Really "A Criminal Act of Dishonesty"?* Digital Clarity Group. Recuperado el 2 de agosto del 2018, de <https://goo.gl/pJ1rp6>
- Webster, K. (2015). *Payments Disruption by Any Other Name*. PYMNTS.COM. Recuperado el 12 de agosto del 2018, de <https://goo.gl/MmD8yW>
- Whitehead, A. N. (1917a). *Process and Reality. An Essay in Cosmology*. Nueva York: The Free Press.

Whitehead, A. N. (1917b). *The Organisation of Thought Educational and Scientific*. Londres: Williams and Norgate.

Whitehead, A. N. (1937[1967]). *Adventures of Ideas*. Nueva York: The Free Press.

Wiener, N. (1948). *Cybernetics or Communication and Control in the Animal and the Machine*. Cambridge: MIT Press.

Zalamea, F. (2012). *Peirce's Continuum: A Methodological and Mathematical Approach*. Recuperado de <http://uberty.org/items/resource/fernando-zalamea-peirces-continuum-a-methodological-and-mathematical-approach/>

Una visión crítica de las nanotecnologías disruptivas

Guillermo Foladori, Noela Invernizzi

Resumen

Las nanotecnologías constituyen uno de los más novedosos procesos de producción y sus productos ya alcanzan todos los sectores económicos. Los gobiernos han declarado área de interés prioritario o estratégico, en vista de su potencial para impulsar el desarrollo económico y la competitividad. En el marco de estudios que tratan acerca de la evaluación de beneficios, impactos y efectos perjudiciales de las nuevas tecnologías, este escrito analiza las potenciales barreras para que las nanotecnologías colaboren en un desarrollo inclusivo, dirigido a mejorar las condiciones de vida de amplios sectores de la población. Se concluye que la discusión sobre tecnologías disruptivas deja de lado el contexto socioeconómico y político en el cual las nanotecnologías se desarrollan. Es en tal contexto que deben buscarse las barreras de las nuevas tecnologías para colaborar en un desarrollo inclusivo, tendiente a mejorar las condiciones de vida de la población. Aún sin alcanzar tales objetivos, las nuevas tecnologías pueden resultar en ventajas competitivas y de mercado, que profundicen las brechas de inequidad social. El texto se divide en dos apartados, además de su introducción y conclusiones. En el primero, se exponen las peculiaridades de las nanotecnologías, que permiten identificarlas como una nueva forma de producción disruptiva. En el segundo, se analiza el contexto en el que las nanotecnologías se desarrollan y sus potenciales implicaciones sociales.

Palabras clave: nanociencia, nanoescala, revolución tecnológica, tecnologías disruptivas

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Foladori, G. y Invernizzi, N. (2019). Una visión crítica de las nanotecnologías disruptivas. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 63-83). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.2>

A critical vision of Disruptive Nanotechnologies

Guillermo Foladori, Noela Invernizzi

Abstract

Nanotechnologies are one of the most innovative production processes and their products already reach all economic sectors. Governments have declared them a priority or strategic area of interest, given their potential to boost economic development and competitiveness. In the framework of studies that deal with the evaluation of benefits, impacts and harmful effects of new technologies, this paper analyzes the potential barriers for nanotechnologies to collaborate in an inclusive development, aimed at improving the living conditions of large sectors of society. It is concluded that the discussion on disruptive technologies leaves aside the socioeconomic and political context in which nanotechnologies are developed. It is in this context that the barriers of new technologies must be sought to collaborate in an inclusive development, tending to improve the living conditions of the population. Even without achieving these objectives, new technologies can result in competitive and market advantages that deepen the social inequality gaps. The text is divided into two sections, in addition to its introduction and conclusions. In the first one, the peculiarities of nanotechnologies are exposed, which allow them to be identified as a new form of disruptive production. In the second, the context in which nanotechnologies are developed and their potential social implications is analyzed.

Keywords: nanoscience, nanoscale, technological revolution, disruptive technologies

Introducción

Existe una abundante literatura referente a los cambios tecnológicos radicales que alteran las cadenas de producción, desequilibran la competencia, generan nichos de mercado, y modifican la cantidad y calidad del empleo, entre otras consecuencias. Esta idea de cambios tecnológicos rápidos y con impactos cualitativos en la economía tiene uno de sus más sólidos orígenes en el concepto acuñado por Schumpeter de *destrucción creativa*, a finales de los años treinta (Schumpeter, 1996). Contemporáneamente, y desde los años noventa, surgen otros conceptos como: innovación disruptiva, negocios disruptivos y economía disruptiva. Decenas de ejemplos pueden señalarse, como Internet, los organismos genéticamente modificados, Uber y el *smartphone*. Todo aquel conceptual teórico tiene, al menos, dos aspectos en común.

Por un lado, centra la atención en lo administrativo, empresarial y de negocios o en la eficiencia técnica; busca resaltar el potencial de esas tecnologías para aumentar las ganancias, desplazar a competidores o abrir nuevos nichos de mercado. El acento está siempre en el beneficio económico. Aunque son reconocidos los impactos sociales derivados, como el desempleo asociado en la mayoría de los casos a las nuevas tecnologías o los riesgos a la salud y el ambiente derivados del uso de nuevas tecnologías, de sus productos o procesos, esos impactos son abordados de forma marginal frente a las ventajas económicas. El desempleo, por ejemplo, es considerado algo restringido a tales tecnologías que normalmente es revertido con el surgimiento de otras fuentes de trabajo. Los riesgos son considerados como inevitables, o bien aceptables, frente a los beneficios que la nueva tecnología implica. Para las empresas, los negocios o las ganancias, se trata del enfoque correcto que pone el acento en los beneficios. En sentido opuesto, los impactos sociales bien podrían ser considerados prioritarios y la ganancia, secundaria, pero este no es normalmente el caso. Además, este enfoque supone que todo crecimiento económico es benéfico para la sociedad en su conjunto.

Por otro lado, en ambos casos se analiza el tema fuera del contexto mundial e histórico. No se considera la manera como esas tecnologías participan en las tendencias económicas mundiales y tampoco el momento histórico en que surgen y

se desarrollan. No es lo mismo, por ejemplo, lo disruptivo del vapor utilizado en la industria durante la Revolución Industrial, que tardó un siglo en aplicarse al transporte marítimo, que lo disruptivo de la microelectrónica o el satélite, que en treinta años cambiaron radicalmente la mayoría de los sectores industriales y administrativos. Tampoco es igual una tecnología disruptiva surgida en 1900 que una surgida en el 2000, cuando el grado de globalización de la economía permite que la nueva tecnología se expanda en amplitud a todo el planeta en menor tiempo. Por último, tampoco es igual una tecnología disruptiva como lo fue el motor de combustión interna, que se aplicó básicamente a los transportes, que Internet, que se aplica a todos los sectores productivos, de servicios y financieros.

El término *tecnología disruptiva* fue acuñado por Christensen en 1997. Él compara las tecnologías que incrementan mejoras lentamente, continuando con las mismas funciones, y que llama tecnologías sustentadoras, con las tecnologías disruptivas, que rompen con la trayectoria tecnológica anterior, generando toda una nueva cadena de producción cuyos productos requieren muchas veces diferentes fuentes de energía y materiales que implican funcionalidades nuevas o diferentes medios de transmisión (Christensen, 2016). Así, por ejemplo, la computadora personal sería una tecnología disruptiva, rompiendo con la máquina de escribir manual y la eléctrica. Lo mismo que el teléfono celular, los *smartphones*, los GPS, el sistema de almacenamiento en nube, los implantes electrónicos que monitoreen marcadores biofísicos, la impresoras 3D industriales y otros (DisruptionHub, s. f.).

El concepto de tecnología disruptiva se inspira en el de destrucción creativa, acuñado por Schumpeter en 1939, para indicar que la economía evoluciona por ciclos o quiebres en los que unas tecnologías son suplantadas por otras. Según Christensen, las tecnologías disruptivas solo ganan nichos de mercado al comienzo y demoran hasta cubrir el mercado principal de consumidores. Hoy en día, por ejemplo, la impresora 3D está limitada a un mercado muy reducido y de usuarios finales, pero es posible que en un futuro cercano se convierta en base de producción industrial de escala o que se extienda entre los consumidores suplantando grandes industrias en sectores específicos. Esta tecnología, cualquiera que sea el producto final, rompe con toda la cadena de producción anterior (Garmulewicz, Holweg, Veldhuis y Yang, 2018).

Debe notarse que el concepto de tecnología disruptiva proviene del ámbito de los negocios y la administración de empresas, donde el énfasis está puesto más en las ventajas de mercado de un producto final que en los procesos de producción propiamente dichos. Así, el concepto de tecnología disruptiva no está exento de críticas (Danneels, 2004). Lo que puede ser disruptivo para una empresa o ramo puede no serlo para otra, porque lo disruptivo depende del grado de amplitud de la tecnología y del espacio temporal que se analice. La tecnología a base de vapor,

que surgió en Inglaterra con la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, fue disruptiva para algunas industrias (comenzando por la textil), pero demoró medio siglo en aplicarse al transporte ferroviario y un siglo hasta alcanzar el transporte marítimo. Además, el concepto de tecnología disruptiva se mezcla con el de innovación destructiva y los ejemplos usualmente utilizados alcanzan tanto a sistemas de operación y de mercado, como a tecnologías en el sentido material; Airbnb, por ejemplo, no implica aplicaciones materiales diferentes a las preexistentes, tampoco el sistema Napster de compartir música por Internet en formato MP3, pero son organizaciones productivas que se enfrentan al mercado de manera novedosa.

En las últimas décadas, han surgido tecnologías de más amplio espectro, como las tecnologías de la información y las comunicaciones o las nanotecnologías, que alcanzan casi todos los sectores económicos y pueden, entonces, cambiar más profundamente las trayectorias tecnológicas anteriores. En este caso, la diferencia entre una revolución tecnológica y una tecnología disruptiva se diluye.

Este capítulo trata de las nanotecnologías, un paquete tecnológico muy amplio que luego de poco más de una década con productos en el mercado ha mostrado ser facilitadora, introduciéndose en todos los sectores económicos. La virtud de las nanotecnologías está en el desarrollo y la aplicación de nuevas funciones a los materiales conocidos y a nuevos sistemas nanoestructurados; y como todo sector económico usa materiales, estas tecnologías están llamadas a imprimir su sello a la economía en su conjunto.

El apartado siguiente analiza las principales características de las nanotecnologías y su potencial carácter disruptivo. Luego, sigue otro apartado en el que se enfatiza el potencial impacto social de las nanotecnologías, algo que solo marginalmente aparece en los enfoques sobre tecnologías disruptivas.

La irrupción de las nanotecnologías y su carácter disruptivo

Las nanotecnologías irrumpen en el mercado mundial durante la primera década del siglo XXI, cuando el alcance de la globalización acelerada durante los años noventa ha llegado a conectar virtual y materialmente a casi todos los países del mundo, con lo cual, desde el punto de vista del mercado, puede decirse que estas tecnologías han nacido en cuna de oro.

Otro elemento clave para entender la inserción de las nanotecnologías en el contexto mundial es el nivel de concentración del capital, que para comienzos del siglo XXI es mucho mayor que el existente cuando se da la expansión de Internet o de las biotecnologías en los años noventa.

Las características propias de las nanotecnologías tienen su importancia decisiva en su carácter disruptivo, pero también lo tiene el contexto económico mundial en que se insertan, por ello el análisis de las nanotecnologías en este capítulo pretende ofrecer al lector una visión que va más allá del enfoque común encontrado en la literatura sobre tecnologías disruptivas.

Las nanociencias estudian el comportamiento de la materia a escala nanométrica, es decir, a nivel atómico y molecular¹. Las nanotecnologías aplican ese conocimiento para producir materia prima, diversos dispositivos y hasta productos finales. Es común que se utilice el término *nanotecnología* para abarcar tanto las ciencias como las aplicaciones tecnológicas.

Cuando se manipulan átomos y moléculas, la materia que los comporta manifiesta propiedades diferentes a lo que sucede cuando la misma materia está en escala mayor, incluso en escala microscópica. Las fuerzas cuánticas prevalecen en escala nano en lugar de la gravedad y la inercia que prevalecen en escala mayor. El carbono de un lápiz es un material blando, pero en escala nano puede ser más duro que el acero. El oro es un metal noble, inerte, no se corroe, al menos en el tamaño en que lo conocemos. Pero cuando está en escala nano es sensible a la luz, aumenta su capacidad catalítica, cambia su forma y puede ser usado para fabricar diversos sensores. De hecho, esta propiedad del oro ya se conocía experimentalmente y en los vitrales de la Edad Media se aplicaba para obtener diferentes colores. Sin embargo, la regularidad de las nanopartículas y su producción industrial no ocurre sino hasta finales de los años ochenta, cuando sofisticados microscopios y nanomanipuladores —algunos incluso dentro de los propios microscopios— consiguen observar, caracterizar y manipular las nanopartículas con precisión, y comienza entonces la revolución de las nanotecnologías. El hecho de que los elementos químicos cambien sus propiedades físicas en nanoescala abre un nuevo horizonte a la ciencia y la tecnología. Casi diariamente se descubren nuevas propiedades de diferentes materiales y sus combinaciones.

Además del cambio en las propiedades fisicoquímicas y también biológicas de los materiales en nanoescala, tiene utilidad práctica el propio tamaño menor, lo cual es muy importante por ejemplo en la electrónica y la medicina, pues el diminuto tamaño de los dispositivos permite la incorporación a sistemas en los que no es posible utilizar tamaños mayores, y en todos los sectores la escala es importante debido al ahorro de materia prima.

1 Un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro (10^{-9}). La National Nanotechnology Initiative de Estados Unidos (s. f. a) dice: "*Nanotechnology is science, engineering, and technology conducted at the nanoscale, which is about 1 to 100 nanometers*".

A diferencia de las revoluciones tecnológicas precedentes, que estaban centradas en la energía (por ejemplo, la revolución industrial basada en vapor, electricidad, hidrocarburos), o en un material específico (por ejemplo, el acero), o en un sector de aplicación (por ejemplo, la biotecnología), la revolución de las nanotecnologías afecta a todos los materiales en general y estos son requisito de cualquier sector económico. Por ello, las nanotecnologías se conocen como tecnologías de amplio espectro o de uso general —*general purpose technologies* o *enabling technologies*— (Iacopetta y Graham, 2014; Shea, Grinde y Elmslie, 2011; Youtie, Iacopetta y Graham, 2008). Hay productos con nanocomponentes en los más diversos sectores económicos, del militar a los alimentos, de la aeronáutica a la minería, de los cosméticos a la industria de la construcción (Tsuzuki, 2009).

Las investigaciones sobre las propiedades de los materiales en tamaño nano se remontan a finales de los años ochenta en los países desarrollados. Japón tiene proyectos de investigación y desarrollo sobre partículas ultrafinas desde los años ochenta, al igual que Reino Unido, que entonces financia su primera red de investigación en el tema. El plan chino decenal Climbing Project on Nanometer Science es lanzado en 1990. A nivel privado, las grandes corporaciones de la industria química y electrónica (por ejemplo, Dow, Du Pont, Bayer, Basf, Motorola, Kodak, Hewlett Packard, Texas Instruments, IBM, Xerox) tienen laboratorios de investigación en nanotecnología desde los años ochenta y noventa (Roco, 2003). Pero a partir del lanzamiento de la National Nanotechnology Initiative en Estados Unidos, en el 2000, las nanotecnologías comienzan a ser incluidas en las políticas públicas de ciencia y tecnología de la mayoría de los países.

Científica (2012), consultora en nanotecnología, señala que en el primer quinquenio del siglo *xxi* Estados Unidos, la Unión Europea y Japón concentraban el 85 % de los fondos públicos para investigación y desarrollo en nanotecnologías; pero menos de una década después esta participación se había reducido a cerca del 60 % como resultado de que otros países, destacando China, Rusia e India, pasaron a invertir fuertemente en el rubro.

A juzgar por las patentes registradas en el 2013, que es un indicador de innovación, entre Estados Unidos y Canadá concentran cerca del 57 %; le sigue el Sudeste asiático y Europa (Jordan, Kaiser y Moore, 2014). El grueso del financiamiento público para investigación y desarrollo está en los países desarrollados, pero esto no necesariamente será constante. Datos del periodo 2011-2012 ya insinuaban un cambio en las tendencias, ya que los países con mayor crecimiento en patentes frente al año anterior fueron China con 45 %, Taiwán con 13 % e India con 7 % (Sargent, 2016). Esto, sin embargo, no significa que países en desarrollo puedan fácilmente incorporarse al tren de las nanotecnologías.

Aunque se estima que durante la primera década del siglo xxi la mayoría del financiamiento público para investigación y desarrollo era con fondos públicos, durante la segunda década las inversiones privadas son entre dos y nueve veces mayores, porque la apuesta a la nanotecnología de los capitales de riesgo se desplomó con la crisis del 2008 sin haberse recuperado (Sargent, 2016, p. 6), dejando al capital privado sin competidores. De manera que la delantera en investigación y desarrollo la llevan las grandes corporaciones químicas, y a menos que instalen centros de investigación en los países en desarrollo, estos se retrasarán en la carrera científica y tecnológica, con excepción de los más grandes como China e India, donde los aportes estatales podrán ser suficientes para investigación de punta. A diferencia de la revolución de las biotecnologías de los años ochenta y noventa, en la que inversiones de capital relativamente pequeñas permitían el surgimiento de empresas que terminaron siendo exitosas, en el caso de las nanotecnologías el volumen de inversión de capital es mucho mayor y no permite esta alternativa.

Las promesas más destacadas de las nanotecnologías abarcan muchas áreas; por ejemplo: detección y tratamiento de enfermedades, energías renovables, tratamiento de agua, agricultura y alimentos, materiales que se autorrecuperan, sensores para tóxicos y patógenos, y remediación ambiental (Sargent, 2016).

Luego de más de una década de investigación, los productos de las nanotecnologías irrumpen en el mercado a mediados de la primera década del siglo xxi. A pesar de que no existen registros oficiales, algunos indicadores permiten suponer que su presencia crecerá sin interrupciones. Existen miles de nanomateriales en estudio para ser utilizados como materia prima (Nanowerk, s. f.)², de manera que su entrada masiva en el mercado es previsible.

Al igual que las revoluciones tecnológicas anteriores, se trata de un proceso mundial de avance técnico-científico y aquellos países con menor desarrollo en el área se integran rápidamente. Imbuidos de utopía, algunos científicos suponen que la tecnología es capaz de mejorar las condiciones de vida de los países más atrasados y facilitar que den un salto adelante en su desarrollo (Salamanca-Buentello *et al.*, 2005; Singer, Salamanca-Buentello y Daar, 2005); y aunque la tecnología no solucione problemas socioeconómicos de forma directa, el reto de orientarla hacia la satisfacción de necesidades sociales es éticamente válido.

Es posible que las empresas de Estados Unidos estén a la cabeza mundial en términos de productos en el mercado que incorporan nanotecnologías, aunque no existen registros al respecto. El Woodrow Wilson International Center for Scholars (wwics), con sede en la ciudad de Washington, lleva una lista no exhaustiva

2 “Currently, our database contains about 2,500 nanomaterials” (Nanowerk, s. f.).

de mercancías con nanopartículas y a la fecha registra cerca del 2000 líneas de productos (wwics, 2015).

Respecto al valor en el mercado, hay estimaciones muy dispares. Así, por ejemplo, la firma BCC Research (2014) estima el valor de los nanomateriales en el mercado en 3400 millones de dólares en el 2014, previendo una tasa de crecimiento anual de más del 20% hasta el 2020. Por su parte, el valor de los productos que incorporan nanocomponentes es estimado por Lux Research para el 2014 en 1,6 billones de dólares (LuxResearch, 2014).

No es de sorprender que la mayoría de los productos que incorporan nanotecnología están en las ramas de la electrónica, disciplina en la que se trata de un avance incremental más que disruptivo, una evolución que aprovecha la tendencia a la miniaturización presente en estos ramos industriales y la profundiza. El resto de los productos en el mercado son básicamente suntuarios, como lo muestra el inventario que realiza el wwics (2015). Esto significa que las nanotecnologías aún no entran en los mercados masivos, sino solo en los reducidos de mayor poder adquisitivo.

Las revoluciones tecnológicas van asociadas a diversos impactos sociales y ambientales. Las nanotecnologías no son una excepción, y ya es conocido el efecto tóxico a la salud humana de varias de las más utilizadas nanopartículas o nanoestructuras (Poland *et al.*, 2008; Schulte y Salamanca-Buentello, 2007). Los trabajadores son los más susceptibles a sufrir riesgos a la salud, debido al contacto más directo con la materia prima (Schulte *et al.*, 2014)³, pero los consumidores son el sector más amplio que puede verse comprometido con mercancías no suficientemente analizadas en sus potenciales riesgos.

La historia de la industria química está plagada de ejemplos de productos que se lanzan al mercado y que luego de décadas se comprueba que son cancerígenos, disruptores endocrinos o conllevan otras enfermedades (European Environment Agency [EEA], 2002 y 2013). En términos ambientales, el impacto histórico de los productos químicos es también alarmante, como se ha demostrado en fauna, flora y ecosistemas (Carson, 1962; Colborn, Dumanoski y Meyers, 1997). Para los países en desarrollo, el riesgo a la salud y al medio ambiente es aún mayor, dada la histórica liviandad con que se han tratado estos aspectos.⁴

3 En el caso de las nanotecnologías, los investigadores y técnicos de laboratorio requieren cumplir fuertes protocolos de seguridad (National Nanotechnology Initiative, s. f. b).

4 Existen muchas otras implicaciones sociales de las tecnologías. Una de las más importantes es el aumento de la explotación del trabajo y el crecimiento del desempleo.

Para los países en vías de desarrollo, la nueva revolución de las nanotecnologías viene impuesta. El grado de concentración de investigación y desarrollo, que se puede medir en patentes, dificulta la transferencia del conocimiento. También, la producción industrial de nanomateriales está altamente concentrada en pocas corporaciones, al igual que los instrumentos para su manipulación y estudio (Foladori, 2016). En lo que respecta a la nano materia prima, por ejemplo, la concentración de la producción depende de los materiales utilizados. Los nanotubos de carbono, que son una de las nanoestructuras más utilizadas como materia prima en diversos sectores económicos, tienen su producción altamente concentrada en una docena de grandes empresas químicas. Entre las que tienen mayor volumen de producción está la estadounidense Cnano Technologies, la belga Nanocyl y la japonesa Showa Denko, pero la china Yunnan Great Group sigue cerca.

Tanto en investigación y desarrollo, como en producción de nano materia prima y productos finales, China, Rusia e India están pasando a tener un lugar destacado en la investigación y producción de artículos con nanotecnología; pero muchos otros países en vías de desarrollo tienen, aunque en menor escala, centros de investigación bien equipados y comienzan a producir mercancías a pequeña escala.

En América Latina, los planes de ciencia y tecnología o los de desarrollo han incluido a las nanotecnologías como área estratégica a lo largo de la primera década del siglo xx (Foladori, Figueroa, Invernizzi y Záyago, 2012), en muchos casos asesorados por organizaciones e instituciones internacionales como la OEA, el Banco Mundial o la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (Foladori, 2013). Brasil fue pionero en apoyar con financiamiento público redes de investigación en nanotecnología y luego al elaborar planes estratégicos para el desarrollo de estas tecnociencias; Argentina le siguió. Por su parte, aunque México nunca tuvo una política pública de nanotecnología, financió laboratorios muy bien equipados. Brasil continúa siendo líder en América Latina si se lo mide en publicaciones científicas o patentes, seguido de México y Argentina. Pero otros países tienen redes e investigación y han hecho avances a pesar de los exiguos financiamientos, como es el caso de Chile, Colombia o Cuba (Foladori *et al.*, 2012).

Recientes revelaciones muestran la existencia de 53 empresas que producen con nanotecnología en México, 37 en Argentina y ocho en Colombia (Foladori, Invernizzi, Osma y Záyago, 2018); si a esto se le agregan las más de seiscientas que habría en Brasil (Plentz, 2013), se aprecia que las mercancías de estas tecnologías no solo están entrando por el mercado exterior, sino que también están siendo producidas internamente.

Dos aspectos preocupantes del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina son: i) la ausencia de un tratamiento serio para los potenciales riesgos a la

salud y el medio ambiente de los nanomateriales; y ii) la no transparencia de información a los trabajadores, que son el sector más proclive a sufrir riesgos laborales (Invernizzi y Foladori, 2013). Esto se da en un contexto de inexistente reglamentación (Urquijo, 2014), que se mantiene a la fecha. El principio de precaución, que debe ser la base de muchas políticas públicas en un mundo donde el riesgo derivado de la complejidad de las tecnologías se incrementa, no ha sido tomado seriamente en los países de América Latina.

Más allá de las diversas interpretaciones o críticas al concepto de tecnología disruptiva, debe destacarse que el concepto y su discusión se restringen a las posibilidades de ciertas empresas de ser exitosas en el mercado, arruinando o volviendo obsoletas a otras. En ningún momento, la discusión académica sobre tecnologías disruptivas incorpora el potencial efecto sobre la mayoría de la población o los beneficios para un desarrollo incluyente. Se da por supuesto que si las empresas con potencial disruptivo tienen éxito, es porque la sociedad donde se insertan tendrá ventajas económicas, lo cual es altamente discutible. En lo que sigue, daremos algunos argumentos para cuestionar que las nanotecnologías ayuden a un desarrollo equitativo, incluso para la mayoría de la población, sin cuestionar que sean, al mismo tiempo, disruptivas en términos competitivos con las ya establecidas en el mercado.

Nanotecnologías disruptivas y potencialmente excluyentes⁵

La discusión sobre el carácter disruptivo de las tecnologías se limita a las diferencias competitivas entre tecnologías nuevas y establecidas. Queda fuera de la discusión el contexto socioeconómico mundial. Estas dos características ayudan a entender tanto las fuerzas a favor como las opuestas a un desarrollo inclusivo y equitativo dirigido a mejorar las condiciones de vida de amplios sectores de la población; algo que difícilmente surge del análisis de la competitividad entre una tecnología vieja y otra nueva. El caso de las nanotecnologías es elocuente acerca de estas dos características mencionadas.

Las nanotecnologías nacen como área privilegiada de investigación y desarrollo a partir de mediados de los años noventa en los países desarrollados, y durante la primera década del siglo *xxi* en otros países de industrialización tardía y en muchos países en desarrollo, continuando luego en el resto del mundo. Dos conceptos interrelacionados cristalizan el contexto: globalización y políticas neoliberales. Juntos, estos conceptos ponen a las nanotecnologías en un contexto en el

5 Este apartado sigue, en parte, argumentos expuestos en Foladori (2015 y 2016).

cual las posibilidades de transferencia de tecnología entre países, de migración de capitales entre países y de flexibilidad de restricciones reglamentarias son mucho más profundas que el contexto en el cual surgieron las tecnologías de la información y comunicación en los años setenta e incluso a principios de los ochenta en muchos países (Harvey, 2011).⁶ Además, ese periodo de quiebre de siglos se caracteriza por una importante concentración de capitales, que ha puesto rápidamente a las nanotecnologías bajo la sombrilla de las grandes corporaciones químicas.

La consultora Científica (2008, p. 27) señala: “Recientemente el número de productores de nanomateriales ha decrecido en la medida en que se centraliza y las compañías químicas multinacionales dominan el mercado”. El contexto de surgimiento de las nanotecnologías, prácticamente a mediados de la primera década del siglo *xxi*, era de mayor concentración que en cualquier periodo anterior (Foster, McChesney y Jonna, 2011).

La concentración del capital se vio apoyada por diversos procesos de regulación e institucionalización, como la protección a la propiedad intelectual. Estos son procesos demorados, caros y susceptibles a interminables juicios⁷ que dificultan el control por parte de pequeñas y medianas empresas y favorecen la concentración. Las aplicaciones a patentes en la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) fueron 20 000 en 1990, 90 000 en el 2000 y más de 140 000 en el 2006 (OMPI, 2007).⁸

Otro elemento relacionado con la concentración del capital es el crecimiento de las ramas financieras de las grandes corporaciones. Estas han creado fondos de capital de riesgo para financiar pequeñas y medianas empresas controlando su destino (*strategic investors*); bien sea por un proceso de fusión y adquisiciones o bien por financiamientos que incluyen cláusulas de participación en las mesas directivas. Todo ello conduce a que los dueños de las nuevas empresas no tienen su

6 El caso de las biotecnologías, que irrumpen en los ochenta y noventa, es algo diferente porque el capital inicial de las empresas es mucho menor que el necesario para muchas ramas que utilizan nanotecnología.

7 Según la Asociación Americana de Propiedad Intelectual (AIPPI), el costo de litigar una patente de nivel medio es de 2,6 millones de dólares, el cual se ha incrementado en 70 % desde el 2001.

8 Según datos sobre la OMPI recopilados por la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI) en el 2009, entre el 2000 y el 2007 cerca del 42 % de las patentes estaba en manos de diez grandes corporaciones como la Bayer, Philips y 3M, y algunas universidades estadounidenses de gran poder económico, como la Universidad de California y el MIT. En términos de países poseedores de las patentes, la concentración es aún más clara, con Estados Unidos teniendo más del 60 % (Observatorio Iberoamericano de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2008).

objetivo puesto en crecer y expandirse, sino en venderlas tan pronto logren algún reconocimiento en el mercado. Apenas una nueva empresa (*startup*) logra afianzarse, y esto puede suceder en dos a cinco años, tiende a ser vendida a grandes corporaciones o a fusionarse con otras mayores. Se trata de una doble tendencia. Por un lado, de las grandes corporaciones que en lugar de invertir en formación de personal calificado, seleccionan del mercado aquel ya probado (Graham, 2005)⁹; por otro lado, porque los costos de mantenimiento de empresas de alta tecnología —con excepción de pocas ramas— han aumentado tanto en términos administrativos y legales, como materiales¹⁰, y en el área de las nanotecnologías el equipo y las instalaciones requieren de grandes inversiones¹¹.

Un elemento coyuntural para la rápida concentración del capital en las nanotecnologías ha sido la crisis del 2008. Los productos de las nanotecnologías y las empresas con investigación y desarrollo en el rubro habían surgido apenas tres o cuatro años antes, cuando existía capital de riesgo. Pero la crisis del 2008 retiró el capital de riesgo de cualquier inversión que no tuviera un retorno rápido y visible (National Center for Manufacturing Sciences [NCMS], 2010, pp. 20 y 23). En este sentido, la coyuntura económica reforzó la tendencia a la concentración del capital. El estudio del National Center for Manufacturing Sciences sobre estrategias de comercialización de nanotecnología durante 2008-2010, y focalizado en el llamado “valle de la muerte” o cómo pasar de la investigación y desarrollo a la producción industrial, comenta el impacto de la crisis en la concentración del capital y el control de la cadena de valor mediante la compra o asociación de las pequeñas empresas con las grandes e integrando verticalmente la cadena de valor:

Fuertes compañías de nanotecnología explotaron la caída industrial invirtiendo o adquiriendo competidores tecnológicos subvaluados e integrando verticalmente a abastecedores de materiales y de procesos intermedios, incre-

-
- 9 “Crecientemente grandes compañías (públicas y privadas) están estableciendo fondos de capital de riesgo afiliados para invertir en compañías *startup* de alta tecnología” (Graffagnini, 2009, p. 257).
- 10 Los costos de defender las patentes y la propiedad intelectual han crecido significativamente y es otra razón para que las *startups* se fusionen o se vendan (McNeil *et al.*, 2007).
- 11 “Con la excepción de cerca de media docena de compañías, toda *startup* tecnológica está a la venta”, dijo Jim Moore, fundador y CEO de J. Moore Partners, una firma especializada en asociación y adquisición de tecnología. “Según un estudio reciente de Ernst y Young, el volumen de asociaciones y adquisiciones en el área tecnológica saltó de 41 por ciento en 2011 hasta llegar a niveles no vistos desde el *boom* de las puntocom” (Farr, 2013).

mentando así el control de los productos / procesos de las cadenas de valor.
(NCMS, 2010, p. 20)¹²

La consultora Lux Research (2009) también opina que la crisis favorece a las grandes corporaciones en detrimento de las *startups*:

La economía ofrece un margen a las largas corporaciones y desafía a las *startups*. La caída de la economía invita a los beneficiados con buenos recursos a renovar y reposicionar sus portafolios tecnológicos golpeando y estrangulando a las pequeñas compañías, abaratándolas. Las *startups* apuradas por circulante lo necesitan como prioridad para sobrevivir mientras los mercados se recuperan.¹³

En resumen, es dudoso que países en desarrollo, salvo los muy grandes como China o India, puedan salir al mercado mundial compitiendo exitosamente con nanotecnologías. A nivel empresarial, es también dudoso que pequeñas o medianas empresas de investigación y desarrollo puedan prosperar más allá de los primeros tres a cinco años en el mercado de las nanotecnologías.

Mientras estas tendencias objetivas de la economía se han impuesto concentrando el capital y haciendo difícil el surgimiento de pequeños competidores, las políticas de ciencia y tecnología, que con cierta independencia podrían ayudar a países en desarrollo a tomar un camino más independiente e incluso desde el punto de vista social, no lo han hecho. Las políticas de ciencia y tecnología de los países en vías de desarrollo han venido reproduciendo recetas internacionales sin alterar en nada las tendencias económicas prevalecientes de la globalización¹⁴. Cuatro características son comunes a estas políticas de ciencia y tecnología, y pueden encontrarse en la mayoría de los planes nacionales de los más variados países:

- Las políticas se homogenizan en torno a lo que se consideran los tres agentes de la innovación: la empresa, el gobierno y la universidad (Etzkowitz y Leydesdorff, 2001; Freeman, 1995; Lundvall, 1992; Nelson, 1993). Aunque algunas de las teorías de la innovación, y más claramente las políticas de ciencia y tecnología, incorporan el diálogo con otros sectores sociales como trabajadores, organizaciones internacionales y ONG, estos sectores no son decisivos en

12 Con base en una encuesta a 270 ejecutivos en nanotecnología.

13 Carbon Nanotechnologies Incorporated (CNI), una empresa fundada por el premio Nobel de Química 1996 Richard Smalley y codescubridor de los fullerenos, fue vendida en el 2008 en 5,4 millones de dólares cuando el precio de oferta inicial era de 180 millones (Científica, 2008).

14 Para las nanotecnologías en América Latina, véase Foladori (2013).

los planes y aparecen como parte del “ambiente” social en que se desarrolla la innovación. Esta restricción en la participación de sindicatos y ONG en las políticas tiene graves consecuencias. Cada innovación tecnológica va acompañada de un aumento de la productividad del trabajo, generalmente sin un aumento proporcional en la parte salarial, lo cual significa un incremento de la tasa de explotación del trabajo y un argumento para que los sindicatos estén alerta y hasta se opongan a la innovación tecnológica¹⁵. Desde el punto de vista del consumidor, organizado en ONG, la falta de participación en los planes de ciencia y tecnología debilita que las medidas de control de riesgo a la salud y el medio ambiente sean monitoreadas por organismos imparciales, con lo cual los productos de la tecnología corren el riesgo de que el consumidor los rechace, afectando la innovación.

- Desde finales de los años noventa, los mecanismos de difusión del conocimiento científico a través de Internet integran a investigadores de todo el mundo en un ambiente global de revistas científicas, foros de discusión y redes de investigación. Este ambiente es controlado por un puñado de editoriales electrónicas que venden sus publicaciones y por el idioma inglés, lo que marca una profunda desigualdad en el acceso y la difusión de la investigación científica.
- El desarrollo de la división social del trabajo ha ido de la mano con el surgimiento de “productos” de cada etapa. Si el conocimiento, la tecnología y la producción forman un proceso compacto, el producto final es lo que identifica la utilidad del proceso en su conjunto. Si el proceso está dividido en distintas actividades, cada una de ellas debe mostrar su utilidad. Surgen los productos intangibles, dentro de los cuales las patentes, que son los más elocuentes, crecen exponencialmente a partir del siglo XXI. Pero estos productos intangibles, aun teniendo precio en el mercado, pueden no representar utilidad alguna o pueden no aplicarse (Foladori, 2014).
- Los repetidos efectos no deseados del desarrollo tecnológico o las aplicaciones éticamente discutibles, como las relacionadas con la tecnología militar, han provocado la reacción de los consumidores a las nuevas tecnologías desde la implementación de la bomba atómica en la Segunda Guerra Mundial, pero

15 Neoschumpeterianos e institucionalistas consideran que la innovación beneficia a la sociedad en su conjunto, ya que esta termina coevolucionando junto con la tecnología, aprovechando todos sus beneficios (Dosi, Teece y Chytry, 1998). Una opinión diferente se puede encontrar en Marx (1980, p. 39), por ejemplo, cuando escribe: “Aún en el caso que se paguen mayores salarios, estos son relativamente inferiores al aumento en la productividad el trabajo. [...] el salario no aumenta en la misma proporción en la que se eleva este trabajo por encima del trabajo medio, de que, por consiguiente, se produce siempre un aumento relativo en el tiempo de plustrabajo”.

también como resultado de los químicos tóxicos en la agricultura, de las explosiones de pozos petrolíferos, de los efectos secundarios de los fármacos y del *fracking*, entre otros. ONG y organizaciones incluso académicas monitorean el comportamiento ético de científicos y sus instituciones, y reclaman que el investigador científico asuma no solamente una actitud ética como profesional dentro del laboratorio, sino también sobre las consecuencias de su investigación en los potenciales productos e impactos en la sociedad y el medio ambiente (Mitcham, 2003).

Las contradicciones arriba mencionadas son desafíos a los cuales se enfrentan las políticas de ciencia y tecnología. El comienzo del siglo *xxi* ha estado marcado por esta nueva revolución tecnológica de las nanotecnologías, pero las políticas públicas que las han acompañado reproducen las debilidades arriba anotadas y pueden poner en entredicho un desarrollo de las nanotecnologías que garantice la mejora de las condiciones de vida de la población. Esto último es un aspecto que debe considerarse cuando se discute el carácter disruptivo de una nueva tecnología.

Conclusiones

Las nanotecnologías pueden pensarse como un paquete de tecnologías disruptivas, en la moderna acepción del término, que supone un cambio cualitativo, más que incremental, en los procesos de producción. Esta potencialidad está dada porque las nanotecnologías suponen el empleo de las manifestaciones fisicoquímicas y biológicas novedosas que presenta la materia en nanoescala. Precisamente, por tratarse del uso “diferente” de los materiales, estas tecnologías pueden ser aplicadas a todos los sectores económicos, ya que todos utilizan materiales sea de uno u otro tipo.

Lo disruptivo de las nanotecnologías va mucho más allá del impacto en los negocios o en las empresas, o incluso en la sustitución de unas tecnologías por otras. Las nanotecnologías son disruptivas porque pueden llegar a ser sumamente desestructurantes en sus implicaciones sociales y ambientales. Primero, porque al nacer cobijadas por las tecnologías de la información y las comunicaciones, que ya están plenamente establecidas en todos los sectores económicos, las nanotecnologías surgen en una economía plenamente globalizada. Segundo, porque el tamaño de la materia manipulada facilita la incorporación a procesos de otra forma imposibles, aun en lo que se refiere a borrar las distancias entre lo vivo y lo no vivo, algo que a nivel atómico se pierde.

Tercero, porque los primeros dos aspectos permiten prever que las nanotecnologías están llamadas a reducir sustancialmente el trabajo vivo, con lo cual los niveles de desempleo se dispararán aún más. Cuarto, porque las políticas públicas,

y en particular las de ciencia y tecnología, heredadas de los proyectos neoliberales de los años noventa, han forzado a académicos e investigadores a reducir su actividad a los intereses de la empresa privada, lo cual significa reducir la visión y el alcance a los resultados inmediatos que rindan beneficio económico.

Con esto, las preocupaciones sobre los impactos sociales y los riesgos a la salud y el medio ambiente de las nanotecnologías quedan en segundo plano en la práctica, aunque aparezcan en titulares en el discurso. Si a esto se le suma que la nano materia prima y productos intermedios y los equipos de nanotecnología están altamente concentrados en grandes corporaciones, es posible que el grado de concentración del capital y consecuente inequidad mundial sea una fuerza difícil de contrarrestar con medidas técnicas o administrativas.

Referencias

- BCC Research. (2014). *Nanotechnology: A Realistic Market Assessment*. Recuperado de <http://www.reportlinker.com/p096617/Nanotechnology-A-Realistic-Market-Assessment.html>
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Nueva York: Fawcett Publications.
- Christensen, C. M. (2016). *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Boston: Harvard Business Review Press.
- Científica (2008). *The Nanotechnology Opportunity Report* (3.^a ed.). Nueva York: Científica.
- Científica (2012). *Nanotechnology Takes a Deep Breath and Prepares to Save the World. Global Nanotechnology Funding in 2009*. Recuperado de <http://popnano.ru/file/Nanotechnology%20Takes%20a%20Deep%20Breath.pdf>
- Colborn, T., Dumanoski, D. y Meyers, J. P. (1997). *Our Stolen Future: Are We Threatening Our Fertility, Intelligence, and Survival?—A Scientific Detective Story*. Nueva York: Plume.
- Danneels, E. (2004). Disruptive Technology Reconsidered: A Critique and Research Agenda. *Journal of Product Innovation Management*, 21(4), 246-258. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0737-6782.2004.00076.x>
- Dosi, G., Teece, D. y Chytry, J. (1998). *Technology Competitiveness: Perspectives on Industrial and Corporate Change*. Oxford: Oxford University Press.
- European Environment Agency (EEA) (2002). *Late Lessons from Early Warnings: The Precautionary Principle 1896-2000 — European Environment Agency*. Recuperado de http://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22

- European Environment Agency (EEA) (2013). *Late Lessons from Early Warnings: Science, Precaution, Innovation*. EEA Report No. 1/2013. Recuperado de <http://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2>
- Etzkowitz, H. y Leydesdorff, L. (2001). The Transformation of University-Industry-Government Relations. *Electronic Journal of Sociology*, 54(4), 101-117.
- Farr, C. (2013). Get acquired! An Idiot's Guide to Technology M&A. *VentureBeat*. Recuperado el 15 de noviembre del 2014, de <http://venturebeat.com/2012/12/26/mergers-acquisitions/>
- Foladori, G. (2013). Nanotechnology Policies in Latin America: Risk to Health and Environment. *NanoEthics*, 7(2), 135-147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11569-013-0178-2>
- Foladori, G. (2014). Ciencia ficticia. *Estudios Críticos del Desarrollo*, 4(7), 41-66.
- Foladori, G. (2015). Políticas de ciencia y tecnología: ¿beneficios para quién? *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 10(Supl.1). Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-00132015000400012
- Foladori, G. (2016). Políticas públicas en nanotecnología en América Latina. *Problemas del Desarrollo*, 186(47), 59-82. Recuperado de www.probdes.iiec.unam.mx/numeroenpdf/
- Foladori, G., Figueroa, S., Invernizzi, N. y Záyago, E. (2012). Características distintivas del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina. *Sociológicas*, 14(30), 330-363.
- Foladori, G., Invernizzi, N., Osma, J. F. y Záyago Lau, E. (Eds.). (2018). Las nanotecnologías en la cadena de producción. En G. Foladori, *Cadenas de producción en las nanotecnologías en América Latina*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Foster, J. B., McChesney, R. W. y Jonna, J. (2011). Monopoly and Competition in Twenty-First Century Capitalism. *Monthly Review*, 62(11).
- Freeman, C. (1995). The National System of Innovation in Historical Perspective. *Journal of Economics*, 19(1), 5-24.
- Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuis, H. y Yang, A. (2018). Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold? *California Management Review*, 30(6). Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0008125617752695>
- Graffagnini, M. J. (2009). Corporate Strategies for Nanotech Companies and Investors in New Economic Times. *Nanotechnology Law & Business Journal*, 6(2).
- Graham, P. (2005). *Hiring is Obsolete*. Recuperado de <http://www.paulgraham.com/hiring.html>

- Harvey, D. (2011). *A brief History of Neoliberalism*. Oxford: Oxford University Press.
- Iacopetta, M. y Graham, S. (2014). Nanotechnology and the Emergence of a General Purpose Technology. *Annals of Economics and Statistics*, 115/116, 5-35. Recuperado de <http://ssrn.com/abstract=1334376>
- Invernizzi, N. y Foladori, G. (2013). Inequality Gaps in Nanotechnology Development in Latin America. *Journal of Arts and Humanities*, 2(3), 36-45. Recuperado de http://www.theartsjournal.org/images/archive_articles/April2013/4.pdf
- Jordan, C. C., Kaiser, I. N. y Moore, V. C. (2014). 2013 Nanotechnology Patent Literature Review: Graphitic Carbon-Based Nanotechnology and Energy Applications Are on the Rise. *Nanotechnology Law & Business*, 11(2), 111-125.
- Lundvall, B. (Ed.). (1992). *National Innovation Systems: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*. Londres: Frances Pinter.
- LuxResearch (2009, junio 9). *The Recession's Ripple Effect on Nanotech*. Recuperado el 17 de noviembre del 2014, de https://portal.luxresearchinc.com/research/report_excerpt/4995
- LuxResearch (2014). *Nanotechnology Update: Corporations Up Their Spending as Revenues for Nano-Enabled Products Increase*. Recuperado el 21 de abril del 2017, de <https://members.luxresearchinc.com/research/report/13748>
- Marx, K. (1980). *Capital y tecnología. Manuscritos inéditos (1861-1863)*. (A. García, trad.). México, D.F.: Terra Nova.
- McNeil, R. D., Lowe, J., Mastroianni, T., Cronin, J. y Ferk, D. (2007). *Barriers to Nanotechnology Commercialization: Final Report*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/292752419_Barriers_to_Nanotechnology_Commercialization_Final_Report
- Mitcham, C. (2003). Co-Responsibility for Research Integrity. *Science and Engineering Ethics*, 9(2), 273-290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11948-003-0014-0>
- Nanowerk (s. f.). *Nanowerk Nanomaterials Database*. Recuperado el 20 de marzo del 2013, de http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php
- National Nanotechnology Initiative (s. f. a). *What is Nanotechnology?* Recuperado el 18 de octubre del 2016, de <http://www.nano.gov/nanotech-101/what/definition>
- National Nanotechnology Initiative (s. f. b). *Resources for Nanotechnology Laboratory Safety*. Recuperado el 18 de octubre del 2016, de <http://www.nano.gov/LabSafety>
- National Center for Manufacturing Sciences (NCMS) (2010, agosto 23). *2009 NCMS Study of Nanotechnology in the U.S. Manufacturing Industry*. Recuperado de http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/2009_ncms_Nanotechnology.pdf

- Nelson, R. (1993). A Retrospective. En R. Nelson (Ed.), *National Innovation Systems. A Comparative Analysis* (pp. 504-524). Oxford: Oxford University Press.
- Observatorio Iberoamericano de Ciencia, Tecnología e Innovación (2008). *La nanotecnología en Iberoamérica. Situación actual y tendencias*. Recuperado de <http://www.oei.es/salactsi/nano.pdf>
- Organización Mundial de Propiedad Intelectual (OMPI) (2007). Informe de la OMPI sobre patentes. Recuperado de http://www.wipo.int/export/sites/www/freepublications/es/patents/931/wipo_pub_931.pdf
- Plentz, F. (2013). *Brazilian Nanotechnology Initiative*. Presentado en “Workshop Nanotecnologia e Sociedade na América Latina”. Universidad Federal de Paraná, Curitiba.
- Poland, C. A., Duffin, R., Kinloch, I., Mayonard, A., Wallace, W. A., Seaton, A., ... Donaldson, K. (2008). Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature Nanotechnology*, 3(7), 423-428.
- Roco, M. C. (2003). Broader Societal Issues of Nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, 5, 181-189.
- Salamanca-Buentello, F., Persad, D. L., Court, E. B., Martin, D. K., Daar, A. S. y Singer, P. A. (2005). Nanotechnology and the Developing World. *PLoS Medicine*, 2(5), e97. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020097>
- Sargent, J. (2016, septiembre 15). *Nanotechnology: A Policy Primer*. Congressional Research Service RL34511. Recuperado de <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL34511.pdf>
- Schulte, P. A., Geraci, C. L., Murashov, V., Kuempel, E. D., Zumwalde, R. D., Castranova, V., ... Martínez, K. F. (2014). Occupational Safety and Health Criteria for Responsible Development of Nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, 16(1). doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-013-2153-9>
- Schulte, P. A. y Salamanca-Buentello, F. (2007). Ethical and Scientific Issues of Nanotechnology in the Workplace. *Environmental Health Perspectives*, 115(1), 5-12. doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.9456>
- Schumpeter, J. (1996). *Capitalismo, socialismo y democracia*. Barcelona: Ediciones Folio.
- Shea, C. M., Grinde, R. y Elmslie, B. (2011). Nanotechnology as General-Purpose Technology: Empirical Evidence and Implications. *Technology Analysis & Strategic Management*, 23(2), 175-192. doi: <https://doi.org/10.1080/09537325.2011.543336>
- Singer, P., Salamanca-Buentello, F. y Daar, A. (2005). Harnessing Nanotechnology to Improve Global Equity. *Issues in Science and Technology*, 1.

- DisruptionHub (s. f.). *Technology Archives*. Recuperado el 22 de agosto del 2018, de <https://disruptionhub.com/insights/technology/>
- Tsuzuki, T. (2009). Commercial Scale Production of Inorganic Nanoparticles. *International Journal of Nanotechnology*, 6(5), 567-578. doi: <https://doi.org/10.1504/IJNT.2009.024647>
- Urquijo, W. (2014). Regulación de las nanotecnologías en América Latina. *Observatorio del Desarrollo*, 3(12), 15-18. Recuperado de <http://estudiosdeldesarrollo.net/observatorio/ob12/6.pdf>
- Woodrow Wilson International Centre for Scholars (wwics) (2015). *A Nanotechnology Consumer Products Inventory Project on Emerging Nanotechnologies*. Washington: wwics. Recuperado de <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>
- Youtie, J., Iacopetta, M. y Graham, S. (2008). Assessing the Nature of Nanotechnology: Can We Uncover an Emerging General Purpose Technology? *The Journal of Technology Transfer*, 33(3), 315-329. doi: <https://doi.org/10.1007/s10961-007-9030-6>

La fiebre de las nanotecnologías: promesas, inversión y resultados cortos en la era de la tecnociencia

Miguel García-Guerrero

Resumen

Uno de los logros científico-tecnológicos más grandes de la humanidad consiste en la capacidad de manipular la materia a voluntad en la escala de átomos y moléculas, hito que se logró en la década de 1980. En esa misma época, cobró fuerza la idea revolucionaria de la ingeniería molecular: crear nanomáquinas con la capacidad de construir cualquier cosa que necesitemos un átomo a la vez y realizar otras funciones a escala nanométrica. Esto detonó una “fiebre” internacional de inversión pública y privada para aprovechar lo que prometía ser la nueva revolución industrial; nadie quería rezagarse ante esa gran oportunidad. La abundancia de recursos y el trabajo de miles de científicos, en los últimos veinte años, han resultado en cientos de avances “nano” que ya impactan en el modo de vida y de producción en todo el mundo. Además de este impacto, las nanotecnologías sobresalen en varios aspectos que las distinguen de otras grandes olas tecnocientíficas: transdisciplinariedad, diversidad de avances con propiedades extraordinarias y un discurso revolucionario que busca apoyo de diferentes sectores sociales, pero que, así como produjo entusiasmo inicial, ahora también genera desencanto. El presente capítulo ofrece una caracterización histórica de las nanotecnologías, con atención al contexto que les dio origen, sus principales aspectos técnicos y los mayores avances obtenidos, para cerrar con el panorama social que reacciona ante el avance de este sistema tecnológico.

Palabras clave: construcción social de tecnologías emergentes, historia de las nanotecnologías, inversión en nanotecnologías, nanotecnologías y sociedad

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

García-Guerrero, M. (2019). La fiebre de las nanotecnologías: promesas, inversión y resultados cortos en la era de la tecnociencia. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 85-106). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.3>

The fever of nanotechnologies: promises, investment and short results in the era of technoscience

Miguel García-Guerrero

Abstract

One of the greatest scientific-technological achievements of humanity consists of the ability to manipulate matter at will in the scale of atoms and molecules, a milestone that was achieved in the 1980s. At that same time, the revolutionary idea gained strength of molecular engineering: create nanomachines with the ability to build anything that needs one atom at a time and perform other functions at the nanoscale. This triggered an international “fever” of public and private investment to take advantage of what promised to be the new industrial revolution; nobody wanted to fall behind that great opportunity. The abundance of resources and the work of thousands of scientists over the past twenty years have resulted in hundreds of “nano” advances that already impact the way of life and production throughout the world. In addition to this impact, nanotechnologies stand out in several aspects that distinguish them from other large techno-scientific waves: transdisciplinarity, diversity of advances with extraordinary properties and a revolutionary discourse that seeks support from different social sectors, but which, as well as produced initial enthusiasm, now it also generates disappointment. This chapter offers a historical characterization of nanotechnologies, with attention to the context that gave rise to them, their main technical aspects and the greatest advances obtained, to close with the social landscape that reacts to the advancement of this technological system.

Keywords: social construction of emerging technologies, history of nanotechnologies, investment in nanotechnologies, nanotechnologies and society

Introducción

Nuestro mundo vive actualmente en la era de la tecnociencia, en la cual la vinculación entre ciencia, tecnología y empresa se intensificó a tal grado que “la producción de conocimiento científico y tecnológico se convierte en un nuevo sector económico” (Echeverría, 2003, p. 67). Esto implica que los productos del trabajo tecnocientífico son mercancías, en toda la extensión de la palabra; existe una feroz competencia entre empresas, sectores y países que buscan crear (y vender) el nuevo paradigma tecnoeconómico.

En el pasado, los primeros en apropiarse de las grandes revoluciones han sido sus principales beneficiarios sociales y económicos, por lo cual investigadores, inversionistas y políticos están atentos para aprovechar la nueva gran ola (sea cual sea). Una vez que estos actores se han “subido” al tren de un avance específico, no se limitan a esperar a que la sociedad lo “compre”, se realiza una intensa promoción que busca familiarizar a la sociedad con el nuevo producto e incluso involucrarla en su avance (Andreev y Butyrin, 2011, p. 78). Dicha participación social llega a verse como una ventaja competitiva (Andreev y Butyrin, 2011, p. 78) al evitar reacciones adversas como la que han encontrado los organismos modificados genéticamente (OMG) (Goncuoglu-Eser, 2004, p. 19; McNaghten, 2008, p. 114; Bawa y Anilakumar, 2013, p. 1038).

Fue así que las nanotecnologías (NT) irrumpieron en la escena pública en el discurso mucho antes de hacerlo en el mercado, o incluso en los resultados tecnológicos tangibles, en busca de construir una aceptación anticipada para el trabajo tecnocientífico. Y la estrategia buscaba ganar en dos sentidos:

1. Convencer a científicos, políticos y empresarios de que la ruta para el éxito futuro se encontraba en lo nano. Lograr esto, como se consiguió, significaba acelerar —con trabajo de investigación y recursos abundantes— el proceso para establecer exitosamente una línea de trabajo en la vanguardia del desarrollo tecnológico.

2. Promover los nuevos productos —aun aquellos que apenas son un sueño— en la población para respaldar socialmente la inversión que se realiza y formar clientes potenciales.

Luego del éxito y el impacto socioeconómico de avances de gran calado en el pasado —como la máquina de vapor, la electricidad y las tecnologías de la información y las comunicaciones—, el ánimo de los gobiernos y las empresas (sobre todo en Estados Unidos, Japón y Europa) era más que receptivo a comprometerse con una nueva gran oportunidad. El discurso revolucionario asociado a las NT (primero con Richard Feynman y luego con Eric Drexler) llegó en el momento justo para captar el compromiso de tales sectores, y gradualmente se empezó a cautivar la imaginación del resto de la sociedad con promesas de nuevas tecnologías capaces de resolver todos sus problemas.

Aun así, al ubicarse en la era de la tecnociencia, la herencia de avances recientes —como los ya mencionados OMG— deja una sombra de duda sobre los intereses de los sectores que promueven el avance de un sistema tecnocientífico emergente:

La paulatina irrupción y consolidación de la tecnociencia ha cambiado radicalmente esa relación con el público, al haberse producido una crisis de confianza de los ciudadanos con respecto a la investigación tecnocientífica y, en particular, respecto a los informes o evaluaciones de los expertos. (Echeverría, 2003, p. 87)

Es así como la evolución histórica de las nanotecnologías resulta un caso sumamente interesante: nos permite analizar la fiebre de inversión que se desencadenó con la posibilidad de manipular la materia a escala atómica y molecular, aun cuando no se tenía una tecnología particular con las condiciones para aplicarse ampliamente —como ocurrió en revoluciones pasadas con la máquina de vapor, la electricidad y las computadoras—. En las siguientes secciones, veremos cómo las grandes promesas de resolver problemas, de generar ganancias y, en última instancia, de cambiar el mundo fueron el motor para el avance de las NT.

Una pequeña historia de las nanotecnologías

En un principio, fue John Dalton. En sentido estricto, mucho antes, alrededor del año 400 a. C., los griegos Leucipo y Demócrito fueron los primeros en plantear la idea de una partícula tan pequeña que no pudiera ser dividida: el átomo (del latín *atomum*, indivisible), pero en realidad su planteamiento era mucho más especulativo que científico; nunca señalaron las características que debía tener tal partícula ni una forma práctica de encontrarla. Aunque sus ideas sirvieron como inspiración,

el concepto moderno —científico— de lo que conocemos como átomo llegó mucho después.

A inicios del siglo xix, gracias al trabajo de Antoine Lavoisier los elementos químicos se habían identificado como sustancias que no podían descomponerse en otras más sencillas, y Robert Proust estableció que todos los compuestos tienen proporciones bien definidas de los elementos que los conforman. Dalton partió del trabajo de estos hombres y de sus propios experimentos —con monóxido de carbono y dióxido de carbono— para formular su teoría atómica: los átomos, partículas indivisibles, serían las unidades fundamentales de los elementos químicos (Flores, 1986) y cada elemento —como el hidrógeno, el carbono o el oxígeno— tendría átomos diferentes en función de su masa distintiva (Rogers, 2011, p. 5).

El modelo resultó muy interesante para los científicos de la época; sin embargo, tenía dos problemas esenciales: no había evidencia explícita de la existencia de los átomos de Dalton y tampoco se ofrecía una idea del tamaño que podrían tener tales partículas (o las moléculas que formarían al combinarse en compuestos). Así, todavía a inicios del siglo xx la existencia de los átomos y las moléculas no era un hecho científicamente reconocido; se les consideraba objetos hipotéticos útiles para el trabajo estadístico de la termodinámica realizado por Maxwell (1965) y Boltzmann (1895), pero no se había demostrado su existencia.

Aquí entró en escena Einstein, que en su trabajo sobre el *movimiento browniano* (Einstein, 1905) explicó la trayectoria aparentemente aleatoria de granos de polen sumergidos en agua como consecuencia de los choques de millones de moléculas. Con esto, Einstein estableció las bases para demostrar la existencia de los átomos y determinar su tamaño (Haw, 2005, p. 21). El posterior trabajo experimental de Perrin (1909) confirmó las predicciones de Einstein y estableció el tamaño de las moléculas —formadas por conjuntos de átomos— en el orden de los nanómetros.

Aunque los átomos son las unidades básicas de los elementos químicos, la idea de su indivisibilidad quedó descartada también a inicios del siglo pasado con el descubrimiento de partículas subatómicas: electrones, protones y neutrones. Así, aunque el significado etimológico del término átomo quedó rebasado, el concepto se mantuvo como la nomenclatura científica para las unidades básicas de los elementos.

A partir de estos y otros avances, la primera mitad del siglo xx atestiguó el desarrollo de una de las grandes revoluciones científicas de la historia: la física cuántica. Este paradigma científico amplió el conocimiento de la estructura de la materia y mostró que las reglas del mundo a escala atómica son diferentes a las que encontramos en tamaños mayores. Estos fenómenos extraños y contraintuiti-

vos son la base para que el universo exista tal como es y sirvieron de fundamento para el desarrollo de nuevas tecnologías, como el transistor, el rayo láser, los aparatos de resonancia magnética, las celdas solares y las cámaras digitales, por mencionar algunas.

El 29 de diciembre de 1959, Richard Feynman, físico ganador del Premio Nobel y uno de los artífices del desarrollo de la física cuántica, dictó la conferencia “*There’s Plenty of Room at the Bottom*”, en la que llamó la atención sobre la posibilidad de controlar la materia a una escala muy pequeña (Feynman, 1960). En la historia tradicional de las NT, se marca este evento como el origen, o el banderazo de salida, del campo. La charla fue en esencia “una invitación para entrar a un nuevo campo de la física” (Feynman, 1960), y aunque el nobel nunca trabajó científicamente en este campo y la mayor influencia de sus ideas llegó de forma indirecta, se le ubica como uno de los padres fundadores de las NT.

El primer uso específico del término *nanotecnología* se le atribuye a Taniguchi (1974), quien se refirió a tecnologías capaces de procesar materiales con acabados ultrafinos de un nanómetro¹ (OECD, 2010, p. 21; Eisler, 2012, p. 11). Para 1981, el alemán Herbert Gleiter, al reconocer las propiedades dependientes del tamaño en los materiales a escala nano, empezó a usar un lenguaje con prefijos “nano” y a impulsar la creación de un programa de investigación en este campo (Eisler, 2012, p. 13).

En 1979, Drexler —entonces un estudiante de posgrado en el MIT— se encontró con la transcripción de la conferencia de Feynman y se sintió inspirado por ella para poner las ideas en acción, agregándoles aportes de frontera de la época en la comprensión de la función de las proteínas. En 1981, publicó el artículo “Molecular Engineering: An Approach to the Development of General Capabilities for Molecular Manipulation”, en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences*; ahí planteó su visión de la fabricación molecular, integrando ideas científicas modernas con los conceptos de Feynman para plantear su propia visión de fabricación molecular con precisión atómica (Fanfair, Desai y Kelty, 2007, p. 5).

Sin embargo, hasta ese momento la precisión atómica representaba una utopía, pues no existían instrumentos que permitieran visualizar la materia a esa escala con la resolución necesaria². Esto cambió a inicios de la década de 1980 con el

1 Un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, 1×10^{-9} metros, que sería el tamaño de una molécula de glucosa o diez veces el diámetro del átomo de helio.

2 Los microscopios ópticos solo permiten producir imágenes de objetos del orden de los doscientos nanómetros, mientras que los microscopios electrónicos de la época mejoraban hasta diez veces esa resolución, pero aun así no se acercaban a la capacidad necesaria.

trabajo de los laboratorios de IBM en Suiza: en 1981 Binning y Rohrer desarrollaron el microscopio de efecto túnel, primer aparato que permitió visualizar la materia a escala atómica (OECD, 2010, p. 21; Maclurcan y Radywyl, 2012, p. 7); y en 1986 el propio Binning formó parte del equipo que creó el microscopio de fuerza atómica. Ambos aparatos permiten visualizar, medir y manipular la materia a la escala de nanómetros y ya se comercializaban a finales de esa misma década. Aunque las ideas de Feynman y Drexler inspiraron a muchos investigadores, la base material que abrió la puerta a las NT fueron los “nanoscopios” de IBM.

Dicho avance se complementaría con nuevas técnicas fundamentales para el desarrollo de las nanotecnologías, como la simulación computacional de fenómenos cuánticos y arreglos moleculares, la litografía de rayos X, así como los nuevos métodos para la síntesis de materiales (Maclurcan y Radywyl, 2012, p. 7). Otras piezas importantes fueron el descubrimiento de materiales como los puntos cuánticos en 1983, los fulerenos en 1985 y los nanotubos de carbono en 1991 (Maclurcan y Radywyl, 2012, p. 7).

El propio Eric Drexler dio un paso fundamental para llevar sus ideas —y con ellas un primer vistazo de las NT— a una audiencia mayor: publicó el libro de divulgación *Engines of Creation. The Coming era of Nanotechnology* (1987). Con este material, Drexler le dio más relevancia, y atención, a la (idea de) ingeniería molecular; ya fuera a través de las personas que leyeron el libro directamente o de la onda de noticias en múltiples medios de Estados Unidos que se produjo a partir de la publicación. Aunque las ideas de Feynman y Taniguchi son precedentes básicos, realmente estuvieron inactivas hasta que Drexler ofreció un nuevo panorama de las posibilidades y los riesgos de las tecnologías a escala nano (Selin, 2007, p. 201). El libro planteó el uso de biomoléculas como inspiración para crear ensambladores moleculares capaces de armar artefactos con precisión atómica; se especuló que estos hipotéticos ensambladores moleculares servirían como fábricas de cualquier cosa útil para el ser humano o, en caso de llegar a salirse de control, podrían convertirse en una plaga gris (*grey goo*) de nanopartículas autorreplicantes capaz de acabar con la civilización (Drexler, 1987). Las dos ideas resultaron sumamente provocadoras para agentes científico-tecnológicos y también para diferentes sectores del público no experto: Drexler ofreció una visión de artefactos que vendrían a revolucionar todo, desde las ciencias biológicas hasta los viajes espaciales (Fanfair, Desai y Kelty, 2007, p. 7).

La publicidad derivada del trabajo de Drexler influyó en muchos científicos de todo el mundo que empezaron a interesarse en las NT. Por ejemplo, Richard Smalley —quien después ganaría el Premio Nobel de Química y sería un importante crítico de la visión de Drexler— inicialmente se declaró “*fan* de Eric” (Fanfair, Desai y Kelty, 2007, pp. 8-9) y señaló que *Engines of Creation* lo influyó a trabajar

en NT e incluso regaló copias del libro a las autoridades de la Universidad de Rice (donde trabajaba en ese momento).

Desde los años setenta se hacía investigación a escala de nanómetros, con otra nomenclatura, pero el impacto del libro de Drexler hizo que a inicios de los noventa empezara a tomar auge el uso de la terminología “nano” para describir fenómenos a esa escala (Eisler, 2012, p. 13). El cambio de lenguaje buscó expresar el progreso tecnológico para conseguir apoyo en un momento en que la estructura de las ciencias básicas en Estados Unidos necesitaba recursos; esto se reforzó con el interés de los fabricantes de instrumentos por destacar su capacidad de caracterizar la materia a escala nano. Se produjo entonces una avalancha de cosas nano: revistas especializadas, departamentos de I+D en empresas y, finalmente, estrategias nacionales de gran calado (Eisler, 2012, p. 206).

Durante el último lustro del siglo xx, bajo el liderazgo de Roco y con la colaboración de Smalley, se realizó una intensa gestión para promover a las NT como nuevas Tecnologías de Utilidad General (TUG) con un gran potencial para reactivar la economía y resolver múltiples problemas sociales. Fue en el periodo 1998-2000 cuando se lograron unir campos fragmentados de la ciencia y la ingeniería a escala nano para establecer una definición científica y una visión a diez años para la I+D en NT (Roco, 2011, p. 427). Esta perspectiva quedó planteada en el documento *Nanotechnology Research Directions* (Roco et al., 2000), que sirvió como base para la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI) de Estados Unidos, la cual fue anunciada por el presidente Bill Clinton en el año 2000.

A partir de este momento, a modo de efecto dominó, se observó un creciente compromiso de inversión pública y privada con las NT a nivel mundial. Japón, la Unión Europea y China se ubicaron justo detrás de Estados Unidos como los principales interesados en aprovechar el desarrollo de la nueva ola en ciencia y tecnología. Pese a la innegable importancia de la visión de Drexler, científicos y autoridades públicas comenzaron gradualmente a separarse de sus ideas. Se le empezó a calificar como un “hilado de ciencia ficción” (Meyyapan, citado por Selin, 2007, p. 203); y Smalley, otrora su *fan*, se lanzó en ristre a desmentir muchas ideas de *Engines of Creation* con el apoyo de científicos que hicieron críticas públicas a Drexler en eventos académicos y medios de comunicación (Selin, 2007, p. 203).

Drexler, con el apoyo de un importante número de seguidores, intentó hacer frente a los ataques técnicos que recibió su perspectiva; sin embargo, no fue capaz de detener el giro en la visión hegemónica del nuevo campo. Aunque Drexler se puede apreciar como el hombre que impulsó considerablemente la construcción social de las NT, a final de cuentas perdió la batalla para mantener el significado original del concepto. El proceso de negociación de diferentes agentes que lo apli-

caban según sus propias necesidades (Selin, 2007, p. 210), así como el manejo de las expectativas respecto a los nuevos avances, terminó por orientar las NT hacia un nuevo significado.

La visión original de ingeniería molecular es muy ambiciosa e implica un desarrollo a largo plazo que no tiene certeza de lograrse; mientras que el trabajo con nanopartículas útiles puede ofrecer resultados más modestos, pero con metas viables para cumplir a corto plazo (Selin, 2007, pp. 211-212). Esto no significa que la ingeniería molecular nunca llegue a convertirse en una realidad, está documentado que su trabajo sigue avanzando (Browne y Feringa, 2009); incluso, el Premio Nobel de Química del 2016 se le entregó a Stoddard, Feringa y Sauvage por este tipo de avances, pero la inversión pública y privada que recibe aún es limitada en comparación con la investigación relacionada con nanopartículas útiles; sin embargo, como detalla el reporte de BCC Research (2016), se espera un repunte de estos avances para el año 2021.

La historia de las NT tiene un fuerte componente de comunicación; inició con una estrategia discursiva dirigida primero a investigadores, con Feynman, y luego aparecieron esfuerzos dirigidos a sectores del público no especializado, con Drexler y Roco, para construir una visión integradora cuya novedad no fue el trabajo técnico en sí mismo —mucho del cual se venía realizando décadas atrás—, sino la capacidad de vender a los diferentes sectores el potencial de los nuevos avances. Las NT son probablemente uno de los primeros casos de ciencia y tecnología en una fase de investigación que se ven afectados por creencias populares para crear una especie de “investigación científica pop” (Mariotti *et al.*, 2008, p. 262). De hecho, se trata de una ola científico-tecnológica atípica, por cuanto gran parte de su inversión se presentó de arriba hacia abajo: de la propuesta teórica genérica (como lo es la ingeniería molecular) a la implementación práctica; esto en vez de partir de un avance concreto que se abriera paso en diferentes sectores. Precisamente, este carácter distintivo nos lleva a preguntarnos qué virtud tiene la promesa de las NT que ha conseguido un entusiasmo en la inversión pública y privada a nivel mundial.

Las nanotecnologías: ¿qué son y por qué son trascendentes?

Lo primero que tenemos que aclarar es que las NT no representan un paradigma científico en el sentido planteado por Kuhn (1971). Todos sus avances se basan en paradigmas previos; su novedad radica en la capacidad tecnológica para manipular la materia con precisión atómica y molecular para aprovechar las propiedades de la materia en la escala de los nanómetros.

Por otro lado, aunque con frecuencia se usa una referencia singular, la noción de una sola *nanotecnología* es engañosa, pues se engloban muchos avances con múltiples funciones en diferentes direcciones (David, 2008, p. 6). Las NT representan un concepto paraguas que agrupa un gran número de avances científico-tecnológicos desarrollados desde diferentes campos: microscopía, física cuántica, ciencia de los materiales, electrónica, química, medicina, biotecnología y farmacología, por mencionar algunos. El único elemento en común para tal diversidad de disciplinas es el tamaño; Roco, uno de los pioneros en el impulso a las NT en Estados Unidos, define estas tecnologías como:

[...] la habilidad para controlar y reestructurar la materia al nivel atómico y molecular, en el rango aproximado de 1-100 nm, así como explotar propiedades y fenómenos distintos en esa escala [...]. La meta es crear materiales, dispositivos y sistemas con propiedades y funciones fundamentalmente nuevas a través de la ingeniería en su pequeña estructura. Esta es la última frontera para cambiar económicamente las propiedades de los materiales y la escala de longitud más eficiente para la fabricación y para la medicina molecular. (Roco, 2011, p. 428)

La principal característica que hace especial a la escala “nano” es que las propiedades físicas y químicas de los materiales en este tamaño son dramáticamente diferentes a las de objetos más grandes³. Esto sucede por los efectos del aumento de la superficie en proporción a la masa de los materiales (Buzea, Pacheco y Robbie, 2007, p. 15) y a la naturaleza mecánico-cuántica de la física en el dominio de lo ultrapequeño (Bhushan, 2012, p. 1842).

Pero los materiales a escala nano no son nuevos ni exclusivos de la manipulación humana. En el mar, la brisa desprende nanopartículas de agua con sal y las exhalaciones de volcanes emiten partículas de ceniza a escala nano. En el pasado, hubo tres grandes ejemplos de efectos accidentales de materiales a escala nano con resultados sobresalientes:

- i) Los mayas mezclaron y cosieron el tinte natural índigo con una arcilla porosa que tiene huecos de tamaño nano que encapsularon el color y produjeron el tinte conocido como azul maya, el cual ha perdurado por miles de años sin perder su coloración (José-Yacamán *et al.*, 1996).

3 Por ejemplo, las nanopartículas de oro de tres nanómetros de radio se funden a una temperatura trescientos grados por debajo de la temperatura de fusión del oro. El aluminio no reacciona con facilidad a escala macro, pero se oxida de forma espontánea en tamaño nano. El óxido de zinc, blanco y opaco al manejarse en tamaños tradicionales, se vuelve transparente en su forma nano.

- ii) La copa de licurgo, exhibida en el British Museum en Londres, está hecha con vidrio contaminado con nanopartículas de oro y plata que hacen que al ser iluminada desde atrás muestre una coloración roja, mientras que si la luz procede de enfrente, se ve verde (Freestone *et al.*, 2007).
- iii) El acero de Damasco, que se hiciera célebre por las espadas del Ejército de Saladino en el siglo XII, tiene propiedades sorprendentes de dureza y elasticidad que se explicaron recientemente al comprobar que en su proceso de elaboración por accidente se produjeron nanotubos de carbono que reforzaron su estructura (Reibold *et al.*, 2006).

Los promotores de las NT esperan que las propiedades novedosas de los materiales a escala nano cambien la forma en que vivimos mediante aplicaciones que serán más pequeñas, rápidas, fuertes, eficientes, seguras y confiables. The Project on Emerging Nanotechnologies (<http://www.nanotechproject.org/cpi/products/>) tiene identificados —al 8 de febrero del 2018— más de 1800 productos con NT en el mercado; pero aún no se encuentran innovaciones revolucionarias, más bien se trata de avances incrementales respecto a tecnologías existentes —como procesadores para computadoras más pequeños, mejores sistemas de almacenamiento de datos, cosméticos indelebles, etc.—, y la tendencia es que se orientan más a la comodidad del consumidor que a la solución de problemas sociales. Hay una desconexión entre la retórica revolucionaria y la realidad de las NT (Corner y Pidgeon, 2012, p. 169), pero aun así —cual si se tratara del mercado de valores— los promotores de las NT han logrado vender el potencial del futuro de este sistema científico-tecnológico para involucrar a un gran número de países y corporaciones en una ola mundial de inversión.

Las cifras de las nanotecnologías

Del 2000 al 2011, el sector público mundial destinó 67,5 mil millones de dólares para apoyar investigaciones en NT (Científica, 2011), y solo Estados Unidos ha invertido más de 25 000 millones de dólares del 2001 al 2018 (www.nano.gov). De acuerdo con la firma BCC Research (2014), el mercado mundial de los productos con nanotecnologías en el 2013 estaba valuado en 22,9 mil millones de dólares y aumentó a 24 000 millones en el 2014.

Todo parece indicar que las NT seguirán entre las prioridades de los países que buscan ver más allá de la crisis económica y aprovechar las tecnologías emergentes para la competitividad y el crecimiento a largo plazo (OECD, 2010, p. 14). Para una caracterización general de las nanotecnologías, resulta muy útil revisar los siguientes datos:

Tabla 1. Avance de las nanotecnologías en el periodo 2000-2008

Mundial Estados Unidos	Fuerza de trabajo	Publicaciones en sci	Solicitudes de patentes	Valor de productos NT	Inversión total en I+D	Capital de riesgo
2000	~60 000	18 085	1197	~ \$30 mmd	~\$1,2 mmd	~\$0,21 mmd
	25000	5342	405	~ \$13 mmd	~ \$0,37 mmd	~ \$ 0,17 mmd
2008	~400 000	65 000	12 776	~ \$200 mmd	~\$15 mmd	~ \$1,4 mmd
	150 000	15000	3729	~ \$80 mmd	~ \$ 3,7 mmd	~ \$1,17 mmd

Nota: las cifras expresadas en mmd se refieren a miles de millones de dólares. Las cifras en negritas son a nivel mundial y el texto normal se refiere al caso de Estados Unidos.

Fuente: Roco (2011)

Podemos ver un avance importante en todos los rubros, con crecimiento en la producción científica, el registro de patentes y el valor de los productos en el mercado. Sin embargo, cabe preguntarse si estas tendencias se mantienen después del 2008: es necesario contar con datos más actuales, para lo cual nos sirven las tablas 2 y 3 al abordar aspectos de publicaciones, patentes y ganancias relacionadas con las NT.

Tabla 2. Avance de artículos y patentes relacionados con NT en el periodo 2009-2017

Rubro	2009	2011	2013	2015	2017
Artículos en base de datos ISI (Web of Science)	74104	95571	116689	143401	162511
Patentes otorgadas, United States Patent Office	3119	4748	6354	8588	9145

Nota: elaboración propia con datos del sitio web statnano.com.

Se observa aquí que entre el 2009 y el 2015 cada dos años hay un crecimiento de más de 20 % en las publicaciones relacionadas con NT; en el último periodo, el ritmo bajó ligeramente al 13 % de aumento —entre el 2015 y el 2017— pero aun así se mantiene un crecimiento en doble dígito. En cuanto a las patentes hay un ritmo de avance impresionante del 2009 al 2011 (52 %), que luego baja a valores de 34 % (2011-2013) y 35 % (2013-2015) que siguen siendo muy altos, pero cae a un 6,5 % entre 2015 y 2017. Aunque el ritmo de crecimiento en la producción tecnológica se redujo, el número de patentes por año sigue creciendo y cada vez

más se irán abriendo camino al mercado sus aplicaciones. Esto se refleja, de forma indirecta, en la forma en que han aumentado las ganancias de los productos que contienen NT.

Tabla 3. Ganancias de productos con nanotecnologías en el mundo y Estados Unidos

Ganancias en mmd	2000	2010	Crecimiento anual 2000-2010	2011	2012	2013	2014	Crecimiento anual 2010-2013	Estimado a 2020
Mundial	30	335	25%	514	852	1190	1620	48%	3000
EE. UU.	13	110	24%	170	213	284	370	38%	750

Nota: la sigla mmd expresa cifras en miles de millones de dólares.

Fuente: Roco (2017)

Estas cifras indican, como señalan Mulvaney y Weiss (2016), que la ciencia a escala nano sigue floreciendo a la par de la aparición de resultados tecnológicos. Así, con crecimiento sostenido de dos dígitos, en el 2016 el mercado global de nanotecnologías alcanzó un valor de 39,2 mil millones de dólares (BCC Research, 2016), de los cuales 32,5 mil millones de dólares provienen del mercado de nanomateriales y 56,5 millones de dólares surgen de nanodispositivos. En este escenario, varias empresas de inversión proyectan que el valor global del mercado de productos con nanotecnologías alcanzará los 75 000 millones de dólares en el 2020 (Mulvaney y Weiss, 2016).

La base de datos de patentes de la OCDE⁴ muestra datos interesantes sobre la distribución de patentes en NT por país (o región). Estados Unidos es el líder indiscutible con el 34,8% del total, la Unión Europea tiene el segundo puesto con el 23,46% y sigue Japón con el 21,79%; Brasil es el país latinoamericano más avanzado con el 0,24%, que duplica el 0,12% de México. Una recolección de datos experimental, realizada por la OCDE (2013, p. 160), señala a Estados Unidos como el país con un mayor número de empresas activas en NT, con 4928, y le siguen Alemania (960) y Francia (524); el trabajo de Záyago, Foladori y Figueroa (2012) reportan un total de 101 empresas en México. Los datos de la OCDE también ofrecen información sobre la proporción del gasto de I+D que las empresas destinan a NT: Estados Unidos también encabeza esta lista con 4,8 %, lo siguen México (4,6%) y la Federación Rusa (3,5%).

4 https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=PATS_IPC

Las nanotecnologías como Tecnología de Utilidad General (TUG)

Con frecuencia, se habla de las NT como la TUG del siglo XXI (OECD, 2010, p. 14), por lo cual se espera que alcancen altos niveles de penetración, mejora continua e impulso de innovaciones complementarias para estimular las industrias tradicionales permitiendo nuevas funciones y agregando valor a productos existentes. Además, las NT podrán dar lugar a innovaciones más radicales que permitirán el crecimiento de nuevas compañías e industrias, especialmente en convergencia con las biotecnologías y las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) (OECD, 2010, p. 14).

Existen múltiples estudios que, en los últimos años, se han dedicado a establecer la posible condición de las NT como TUG a través del análisis de datos de patentes y su comparación con casos anteriores de TUG como la electricidad y las TIC. Youtie, Iacopetta y Graham (2008) establecieron que el nivel de penetración de las NT en diferentes áreas de aplicación de patentes es semejante al de las etapas tempranas de las TIC, entre 1976 y 1979. Wong, Ho y Chan (2007) identificaron un paso del dominio inicial en el área de instrumentación para el manejo de las tecnologías hacia desarrollos basados en aplicaciones (lo cual refleja la característica de generación de innovaciones complementarias de las TUG). Los resultados de Palmberg, Dernis y Mirguet (2009) demuestran una creciente distribución de las patentes en un amplio rango de áreas secundarias y campos de aplicación.

Pero un análisis más profundo, realizado por Schultz y Joutz (2010) a partir de un índice de generalidad —la capacidad de ciertas patentes para ser citadas en campos diversos—, mostró ciertas áreas como “procesos químicos y materiales”, “medicina y biotecnología” y “nanoelectrónica” que destacan frente a otras especialidades de NT.

Un caso ejemplar del avance de aplicaciones específicas son los nanotubos de carbono, material cuyo precio, a lo largo de los últimos quince años, ha disminuido de forma impresionante, pasando de más de mil dólares por gramo en 1996 a menos de cien dólares por gramo en el 2011 (Rogers, Adams y Pennathur, 2011); así mismo, la capacidad de producción que en el 2004 no alcanzaba las quinientas toneladas por año, en el 2011 ya superaba las tres mil toneladas anuales (De Volder, Tawfick, Baughman y Hart, 2013).

A pesar de que se trata de un conjunto tecnológico en construcción que apunta a seguir creciendo, los indicadores de patentes sugieren que las NT satisfacen las condiciones principales —penetración, dinamismo tecnológico y generación de innovaciones— para considerarlas como una TUG emergente (Teichert, 2012, p. 125) que está en proceso de consolidarse.

Características de las nanotecnologías

La gran mayoría de las NT que se encuentran actualmente en el mercado son resultado del enfoque de arriba hacia abajo (*top-down*), que consiste en manipular los materiales de lo grande hacia lo pequeño a través de técnicas avanzadas de litografía, corte, grabado y afilado (OECD, 2010, p. 23); en esencia, se trata de “esculpir” los materiales, retirando lo que no se necesita hasta lograr las propiedades deseadas. En contraste, se espera que los avances revolucionarios de las NT lleguen a través del enfoque de abajo hacia arriba (*bottom-up*), más cercano a la visión original de Drexler, que consiste en ensamblar piezas atómicas y moleculares para crear materiales y artefactos útiles a través de procesos de síntesis química, autoensamblaje, ensamblaje por posición e incluso por procesos bioquímicos (OECD, 2010, p. 24). Los principales retos para el trabajo de abajo hacia arriba están en mejorar la eficiencia económica de las técnicas para llevarlas a escala industrial, aunque ya existen materiales —como los nanotubos de carbono y el grafeno— exitosos en este sentido.

Los avances que hoy en día trabajan las NT involucran una amplia gama de disciplinas para su desarrollo, por lo cual sería confuso repasar lo que se hace en cada campo. A fin de ofrecer un panorama general, y de forma más pragmática, nos apoyaremos en el trabajo de Mongillo (2007), David (2008), Freudenburg y Collins (2012, p. 242) y Tsuzuki (2009) para distinguir seis grandes áreas de avance en las que actualmente se distribuye el desarrollo de las NT:

1. Medicina. Nuevos métodos para el diagnóstico de enfermedades; protocolos para la administración de medicamentos con efectos secundarios negativos mínimos (enviando los fármacos a lugares específicos); vendas que evitan infecciones y facilitan la regeneración de piel en quemaduras; sistemas de etiquetado molecular.
2. Energía. Desarrollo de fuentes renovables de energía limpias y costeables (en especial, materiales para celdas solares con mayor eficiencia y versatilidad en su instalación); creación de baterías eléctricas más eficientes, como las que se usan en cámaras digitales y celulares, pero con capacidad para aplicaciones más robustas como autos y casas; catalizadores para combustibles; sistemas de transmisión de energía de alta densidad.
3. Calidad ambiental. Técnicas viables para detectar y eliminar contaminantes del agua y el aire; protocolos innovadores para la remediación de desechos peligrosos; mejoras en procesos industriales orientadas a la reducción en el uso de materias primas.
4. Información y comunicaciones. Técnicas avanzadas para el almacenaje de información; nuevos dispositivos de cómputo (transistores de un solo electrón y

sistemas de computación cuántica); pantallas ultradelgadas, más brillantes y eficientes.

5. Industria pesada. Aplicaciones de nuevos materiales para medios de transporte y para la construcción, enfocados en el desarrollo de fibras más resistentes y ligeras; recubrimientos resistentes al desgaste para alargar la vida útil de la maquinaria; materiales autolimpiantes.
6. Bienes de consumo. Son los menos revolucionarios, pero a la vez los más presentes en el mercado. Incluyen: la producción de alimentos y empaques para alimentos; cosméticos e insumos de cuidado personal; nuevos textiles antimanchas o que facilitan la transpiración; agentes antibacteriales para lavadoras; múltiples aplicaciones en equipo deportivo.

Foladori (2010, pp. 37-38) resume el aporte de las NT en tres fortalezas: la posibilidad de hacer más eficientes los productos que hoy en día conocemos, la posibilidad de hacer productos multifuncionales, y reducir y sustituir significativamente la cantidad de materia prima en muchas ramas industriales. Él mismo apunta la existencia de tres debilidades que se deben tomar en cuenta: la materia trabajada en nanoescala tiene propiedades toxicológicas desconocidas, la cuestión de quién se verá afectado en su salud por esas tecnologías, y la cuestión del empleo y la división social del trabajo, a nivel regional, nacional e internacional (Foladori, 2010, pp. 41-42). De manera semejante, Freudenburg y Collins (2012, p. 242) indican cuatro áreas de riesgo potencial de las NT: la seguridad laboral en relación con la fabricación o el uso de nanopartículas; la seguridad del consumidor en contacto con productos que usan NT; posibles daños ambientales derivados de procesos industriales o de contaminación directa por el uso y desecho de productos con componentes de NT; y posibles alteraciones socioeconómicas, sobre todo en la agricultura, las materias primas y el trabajo. Para hacer viable un desarrollo exitoso de las NT, es imprescindible hacer frente a estos riesgos.

Sin embargo, el riesgo no se puede ver en abstracto, sino que se ubica en un contexto específico: las tecnologías presentan una mezcla de beneficios y riesgos —físicos y sociales— que incluyen la posibilidad de que los efectos nocivos o los benéficos, o ambos, se distribuyan de forma injusta (Priest, 2008, pp. 7-8). Todo el tiempo usamos tecnologías peligrosas si pensamos que sus beneficios valen la pena: tendemos a ignorar o minimizar los riesgos de tecnologías que nos ofrecen claros beneficios como los teléfonos celulares y los automóviles (Priest, 2008, p. 28). Algo interesante es que las personas le prestan más atención al tamaño de las consecuencias e ignoran la probabilidad de que ocurran; hay una creciente preocupación sobre riesgos catastróficos y una oposición correspondiente a las tecnologías que los producen (Berube, 2007, p. 248). Este fue el caso del temor a la plaga gris (*grey goo*), que llamó la atención en las primeras

discusiones públicas sobre NT y al final fue señalada como técnicamente imposible por varios científicos, encabezados por Smalley (2001). En contraste, los hallazgos de riesgos a la salud de ciertas nanopartículas, como las que se usan en algunos cosméticos, han generado menores niveles de presencia mediática y resonancia cultural.

La falta de inquietud no significa que no haya peligro; es preciso investigar los posibles efectos nocivos de las diferentes NT para divulgarlos a las autoridades y a los diferentes sectores del público sin caer en el alarmismo (Priest, 2012, p. 67). En realidad, esto aplica para cualquier avance tecnológico, pero resulta de especial interés en este caso porque las nanopartículas no se pueden observar a simple vista y nuestro cuerpo no percibe de forma inmediata el daño que causan, solo se sienten los efectos a largo plazo:

Se ha mostrado que cuando las nanopartículas son absorbidas, inicialmente pueden no causar ningún síntoma [...] pero aun así pueden causar estrés dentro de los órganos que siguen expuestos, con lo que sus efectos son impredecibles. También existe el asunto de si una nanopartícula, después de absorbida, se acumula en el cuerpo o si la concentración se reduce gradualmente con el tiempo. (Ngô y Van der Voorde, 2014, p. 446)

Si bien algunas experiencias con sistemas tecnológicos pasados se han traducido en regulaciones orientadas a prevenir los riesgos en el manejo de ciertas sustancias y procesos, las técnicas existentes para evaluar la toxicidad de las NT no pueden extrapolarse a partir de lo que ya existe para materiales “grandes”. Las mismas propiedades que hacen novedosas a las NT las vuelven impredecibles y peligrosas, por lo cual el manejo de su seguridad exige especial atención.

Conclusiones

Las NT son un sistema científico-tecnológico en el que se han hecho inversiones considerables a nivel internacional, con las expectativas que esto conlleva, y que corre el riesgo de enfrentarse a una reacción pública adversa semejante a la de los cultivos modificados genéticamente (Macnaghten, 2010, pp. 23-24). Desde un inicio, la búsqueda de una percepción pública favorable es un tema que preocupó a los promotores de las NT:

Se puede afirmar que la nanotecnología y la nanociencia son el primer ámbito científico-tecnológico en el que preocupan abiertamente las percepciones sociales que existen sobre él. Dicho ámbito nace y se desarrolla pendiente o preocupado por las percepciones y actitudes públicas. (Gómez, 2012, pp. 178-179)

Por eso, con la bandera de innovación responsable, las autoridades buscaron caracterizar las preocupaciones sociales de manera proactiva para integrarlas desde etapas tempranas en los programas de investigación en NT (Macnaghten, 2010, p. 24). También se pueden interpretar estas acciones como esfuerzos para supervisar las reacciones públicas y diseñar una sociedad que vivirá con los productos nano, en un afán de allanar el camino para integrar estas nuevas tecnologías a la sociedad (Bensaude-Vincent, 2012, p. 90), evitando estigmas sociales que se han tenido o se tienen en otras áreas de la ciencia y la tecnología (Gómez, 2012, p. 178).

Habría entonces un posible choque entre las visiones con que las diferentes organizaciones se acercan al proceso de divulgación y construcción social de las NT: entre un posible cambio guiado por la oferta tecnológica, con el mercado dándoles forma a los nuevos productos y el gobierno actuando como facilitador de los cambios, y otra ruta definida por el impulso social, que responda a las necesidades y aspiraciones de los diferentes actores y organizaciones involucrados.

Incluir a la sociedad en la construcción de las NT representa un gran reto y la forma de enfrentarlo dice mucho acerca de la concepción que países, organizaciones y personas tienen de la relación entre ciencia, tecnología y sociedad en momentos específicos. Hasta ahora, la propaganda ha prevalecido en el discurso público para la construcción social de las nanotecnologías, pero los resultados cortos (respecto a las expectativas generadas) y los nuevos riesgos que aparecen día a día parecen despertar un clamor para una participación pública mucho más rica. El sistema aún se encuentra en desarrollo y los recursos invertidos por el sector público y el privado no deben ser la palanca que defina la ruta de este sistema tecnocientífico; más allá del simple rol de espectadores o clientes, los diferentes sectores sociales tienen la oportunidad de participar (y hacerse sentir) como agentes importantes en la construcción del resto de esta historia.

Referencias

- Andreev, A. L. y Butyrin, P. A. (2011). Technoscience as an Innovative Social Project. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 81(2), 75-80.
- Bawa, A. S. y Anilakumar, K. R. (2013). Genetically Modified Foods: Safety, Risks and Public Concerns—A Review. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1035-1046.
- BCC Research (2014). *Nanotechnology: A Realistic Market Assessment*. Recuperado de <http://www.reportlinker.com/p096617-summary/Nanotechnology-A-Realistic-Market-Assessment.html>

- BCC Research (2016). *The Maturing Nanotechnology Market: Products and Applications*. Recuperado de <https://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-market-products-applications-report-nan031g.html>
- Berube, D. (2007). Communicating Nanotechnological Risks. En M. C. Roco y W. S. Bainbridge (Eds.), *Nanotechnology: Societal Implications II. Individual Perspectives* (pp. 245-251). Nueva York: Springer.
- Bhushan, B. (2012). Nanotechnology. En *Encyclopedia of Nanotechnology* (pp. 1841-1850). Nueva York: Springer.
- Boltzmann, L. (1895). On Certain Questions of the Theory of Gases. *Nature*, 51(1322), 413-415.
- Browne, W. R. y Feringa, B. L. (2009). Making Molecular Machines Work. En *Nanoscience and Technology* (pp. 79-89). doi: https://doi.org/10.1142/9789814287005_0009
- Buzea, C., Pacheco, I. I. y Robbie, K. (2007). Nanomaterials and Nanoparticles: Sources and Toxicity. *Biointerphases*, 2(4), MR17-MR71.
- Científica (2011). *Global Funding of Nanotechnologies – 2011 Edition*. Recuperado de <http://www.cientifica.com/research/market-reports/nanotech-funding-2011/>
- Corner, A. y Pidgeon, N. (2012). Nanotechnologies and Upstream Public Engagement. Dilemmas, Debates and Prospects? En B. Herr Harthorn (Ed.), *The Social Life of Nanotechnology* (pp. 169-194). Nueva York: Routledge.
- David, K. H. (2008). Socio-Technical Analysis of those Concerned with Emerging Technology, Engagement, and Governance. En K. H. David y P. B. Thompson (Eds.), *What can Nanotechnology Learn from Biotechnology?: Social and Ethical Lessons for Nanoscience from the Debate over Agrifood Biotechnology and CMOS*. Boston: Elsevier/Academic Press.
- De Volder, M. F., Tawfick, S. H., Baughman, R. H. y Hart, A. J. (2013). Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. *Science*, 339(6119), 535-539. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1222453>
- Drexler, E. (1987). *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Garden City: Anchor.
- Echeverría, J. (2003). *La revolución tecnocientífica*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.
- Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen Der Physik*, 322(8), 549-560.
- Eisler, M. (2012). Perspective: Where Nano Came From. En S. Priest, *Nanotechnology and the Public: Risk Perception and Risk Communication* (pp. 9-18). Boca Raton: CRC Press.

- Fanfair, D., Desai, S. y Kelty, C. (2007). *The Early History of Nanotechnology. Nanotechnology: Content and Context*. Houston: Rice University Press.
- Feynman, R. P. (1960). There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, 23(5), 22-36.
- Flores Valdés, J. (1986). *La gran ilusión II. Los cuarks*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Foladori, G. (2010). Las nanotecnologías en contexto. *Sociología y Tecnociencia: Revista Digital de Sociología del Sistema Tecnocientífico*, 2(0), 35-55.
- Freestone, I., Meeks, N., Sax, M. y Higgitt, C. (2007). The Lycurgus Cup — A Roman Nanotechnology. *Gold Bulletin*, 40(4), 270-277. doi: <https://doi.org/10.1007/BF03215599>
- Freudenburg, W. y Collins, M. (2012). Public Responses to Nanotechnology. Risks to the Social Fabric? En B. Herr Harthorn (Ed.), *The Social Life of Nanotechnology* (pp. 241-264). Nueva York: Routledge.
- Gómez, J. (2012). La comprensión pública de la nanotecnología en España. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 7(20), 177-207.
- Goncuoglu-Eser, S. (2004). *Public Attitudes Toward Genetically Modified Foods* (tesis doctoral, Pennsylvania State University, Pennsylvania, Estados Unidos).
- Haw, M. (2005). Einstein's Random Walk. *Physics World*. Recuperado de <https://physicsworld.com/a/einsteins-random-walk/>
- José-Yacamán, M., Rendón, L., Arenas, J. y Puche, M. C. S. (1996). Maya Blue Paint: An Ancient Nanostructured Material. *Science*, 273(5272), 223-225. doi: <https://doi.org/10.1126/science.273.5272.223>
- Kuhn, T. S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas* (Agustín Contín, trad.). México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Maclurcan, D. y Radywyl, N. (2012). Nanotechnology and Limits to Growth. En D. Maclurcan y N. Radywyl (Eds.), *Nanotechnology and Global Sustainability*. Boca Raton: CRC Press.
- McNaghten, P. (2008). From Bio to Nano: Learning the Lessons, Interrogating the Comparisons. En K. H. David y P. B. Thompson (Eds.), *What can Nanotechnology Learn from Biotechnology?: Social and Ethical Lessons for Nanoscience from the Debate over Agrifood Biotechnology and GMOS*. Boston: Elsevier/Academic Press.
- Macnaghten, P. (2010). Researching Technoscientific Concerns in the Making: Narrative Structures, Public Responses, and Emerging Nanotechnologies. *Environment and Planning A*, 42(1), 23-37.

- Mariotti, D., Jackson, M., Lewis, E., Schulte, T. y Kurinec, S. (2008). Nanotechnology in Education: Top-Down and Bottom-Up Approach. En *Innovations 2008. World Innovations in Engineering Education and Research* (pp. 261-272). Arlington: INEER.
- Maxwell, J. C. (1965). *The Scientific Papers*. Recuperado el 7 de noviembre del 2014, de <http://cds.cern.ch/record/106449>
- Mongillo, J. F. (2007). *Nanotechnology 101*. Westport: Greenwood Press.
- Mulvaney, P. y Weiss, P. S. (2016). Have Nanoscience and Nanotechnology Delivered? *ACS Nano*, 10(8), 7225-7226. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05344>
- Ngô, C. y Van der Voorde, M. H. (2014). Risks and Toxicity of Nanoparticles. En C. Ngô y M. H. Van de Voorde (Eds.), *Nanotechnology in a Nutshell* (pp. 439-448). París: Atlantis Press.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2010). *The Impacts of Nanotechnology on Companies Policy Insights from Case Studies*. Recuperado de <http://www.myilibrary.com?id=298558>
- Palmberg, C., Dernis, H. y Miguët, C. (2009). *Nanotechnology: An Overview Based on Indicators and Statistics*. OECD Science, Technology and Industry Working Papers No. 2009/07.
- Perrin, J. (1909). Mouvement brownien et réalité moléculaire. *Annales de Chimie et de Physique*, 18, 5-104.
- Priest, S. (2008). Biotechnology, Nanotechnology, Media, and Public Opinion. En K. H. David y P. B. Thompson (Eds.), *What Can Nanotechnology Learn from Biotechnology?: Social and Ethical Lessons for Nanoscience from the Debate over Agrifood Biotechnology and GMOS*. Boston: Elsevier/Academic Press.
- Reibold, M., Paufler, P., Levin, A. A., Kochmann, W., Pätzke, N. y Meyer, D. C. (2006). Materials: Carbon Nanotubes in an Ancient Damascus Sabre. *Nature*, 444(7117), 286. DOI: <https://doi.org/10.1038/444286a>
- Roco, M. C. (2011). The Long View of Nanotechnology Development: The National Nanotechnology Initiative at 10 Years. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(2), 427-445.
- Roco, M. C. (2017). Overview. En T. O. Mensah, B. Wang, G. Bothun, J. Winter y V. Davis (Eds.), *Nanotechnology Commercialization* (pp. 1-23). Nueva Jersey: Wiley-Blackwell. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119371762.ch1>
- Rogers, B. (2011). *Nanotechnology: Understanding Small Systems* (2.ª ed.). Boca Raton: Taylor & Francis.
- Rogers, B., Adams, J. y Pennathur, S. (2011). *Nanotechnology: Understanding Small Systems* (2.ª ed.). Boca Raton: CRC Press.

- Schultz, L. I. y Joutz, F. L. (2010). Methods for Identifying Emerging General Purpose Technologies: A Case Study of Nanotechnologies. *Scientometrics*, 85(1), 155-170.
- Selin, C. (2007). Expectations and the Emergence of Nanotechnology. *Science, Technology & Human Values*, 32(2), 196-220.
- Smalley, R. (2001). Of Chemistry, Love and Nanobots. *Scientific American*, 285(3), 76-77.
- Taniguchi, N. (1974). On the Basic Concept of Nanotechnology. En *Proceedings of the International Conference on Production Engineering* (pp. 18-23). Tokio: Japan Society of Precision Engineering.
- Teichert, N. (2012). *Innovation in General Purpose Technologies: How Knowledge Gains when It Is Shared*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Tsuzuki, T. (2009). Commercial Scale Production of Inorganic Nanoparticles. *International Journal of Nanotechnology*, 6(5), 567-578.
- Wong, P. K., Ho, Y. P. y Chan, C. K. (2007). Internationalization and Evolution of Application Areas of an Emerging Technology: The Case of Nanotechnology. *Scientometrics*, 70(3), 715-737.
- Youtie, J., Iacopetta, M. y Graham, S. (2008). Assessing the Nature of Nanotechnology: Can We Uncover an Emerging General Purpose Technology? *The Journal of Technology Transfer*, 33(3), 315-329.
- Záyago, E., Foladori, G. y Figueroa, E. A. (2012). Toward an Inventory of Nanotechnology Companies in Mexico. *Nanotechnology Law & Business*, 9, 283.

Edición de genomas con CRISPR/Cas9

Silvia Johana Cañas-Duarte, María Isabel Pérez-López

Resumen

El descubrimiento accidental, hace más de veinte años, de un novedoso elemento en el ADN de microorganismos capaces de vivir en ambientes extremos y los continuos esfuerzos de numerosos y variados sectores de la comunidad científica por descifrar su misterio han tenido un impacto completamente inesperado que hoy revoluciona la biología, la medicina y la biotecnología. El sistema CRISPR/Cas9 ha evolucionado, desde su rol original como un elemento de inmunidad adaptativa en microorganismos para defenderse de elementos invasores, a ser una herramienta increíblemente poderosa para la edición programable en los genomas de prácticamente cualquier organismo, incluido el ser humano. Desde principios del 2013, cuando se publicó por primera vez el potencial de CRISPR/Cas9 para realizar, de forma rápida y sencilla, modificaciones precisas en el ADN de células bacterianas, vegetales y animales, este sistema ha sido aplicado con éxito en procesos de investigación y desarrollo en numerosas áreas como la agricultura, la industria de biocombustibles, la medicina personalizada y la terapia génica, convirtiéndose así en el catalizador de una verdadera revolución en el área de la ingeniería genética. Este desarrollo acelerado ha traído consigo numerosos avances científicos; sin embargo, también genera varios retos técnicos y consideraciones importantes en el ámbito ético. En este capítulo, exploramos el desarrollo y las aplicaciones del sistema CRISPR/Cas9, haciendo énfasis en su historia y en las características que lo hacen revolucionario, además de explorar algunas de las situaciones en las que ha sido implementado y su potencial a futuro.

Palabras clave: edición de genomas, CRISPR/Cas9, ingeniería genética, organismos genéticamente modificados (GMO), clonación, terapia génica

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Cañas-Duarte, S. J. y Pérez-López, M. I. (2019). Edición de genomas con CRISPR/Cas9. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 107-128). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.4>

Editing genomes with CRISPR / Cas9

Silvia Johana Cañas-Duarte, María Isabel Pérez-López

Abstract

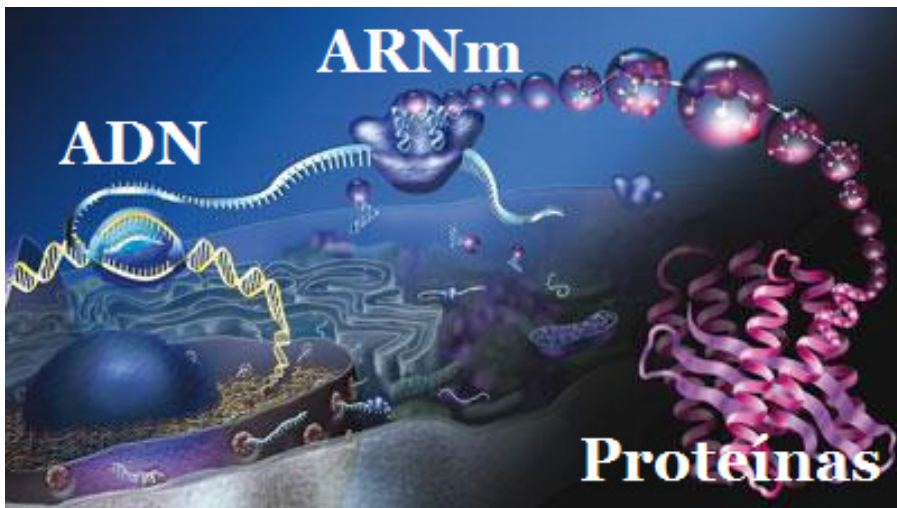
More than twenty years ago, the accidental discovery of a new element in the DNA of microorganisms capable of living in extreme environments, and the continuous efforts of numerous and varied sectors of the scientific community to decipher its mystery, has had a completely unexpected impact that today is changing the way we understand biology, medicine and biotechnology. The CRISPR / Cas9 system has evolved, from its original role as an element of adaptive immunity in microorganisms to defend against invading elements, to be an incredibly powerful tool for programmable editing in the genomes of practically any organism, including the human being. Since 2013, when we first spoke about the potential of CRISPR / Cas9 to make precise modifications in the DNA of bacterial, plant and animal cells, quickly and easily, this system has been applied successfully in research processes and development in numerous areas such as agriculture, biofuels industry, personalized medicine and gene therapy. Thus, it became the catalyst for a true revolution in the area of genetic engineering. This accelerated development has brought numerous scientific advances. However, it also generates several technical challenges and important considerations in the ethical field. In this chapter, we explore the development and applications of the CRISPR / Cas9 system, emphasizing its history and the characteristics that make it revolutionary, as well as exploring some of the situations in which it has been implemented and its future potential.

Keywords: genome editing, CRISPR / Cas9, genetic engineering, genetically modified organisms (GMO), cloning, gene therapy

Introducción

Desde el descubrimiento del dogma central de la biología molecular en 1958 (Crick, 1970), en el cual se identificó el proceso de transmisión y expresión de la información genética codificada en la doble hélice de ADN por medio de su transcripción a ARN y su consecutiva traducción a proteínas (Figura 1), la comunidad científica ha hecho esfuerzos continuos para desarrollar nuevas tecnologías que permitan analizar, modificar y manipular el genoma de diversos organismos.

Figura 1. Ilustración gráfica del dogma central de la biología molecular



Nota: La información genética se encuentra codificada en la doble hélice del ADN como una secuencia lineal de los cuatro nucleótidos (adenina, timina, guanina y citosina). Esta secuencia de ADN es transcrita a una molécula de ARN mensajero (ARNm) por la enzima ARN polimerasa. Finalmente, el ARNm es traducido a una secuencia de péptidos que conforman una proteína por medio de la acción de los ribosomas.

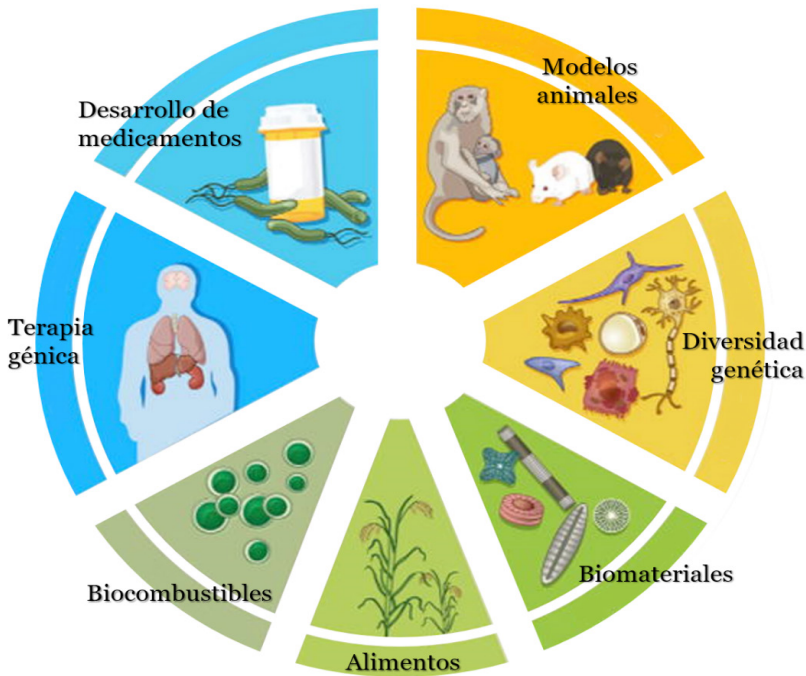
Fuente: imagen modificada de Rager Fuller (2012)

Durante la última década, se han desarrollado métodos nuevos y más económicos que permiten la secuenciación de ADN, haciendo cada vez más asequible el estudio de genomas completos de diversos organismos, entre ellos el humano, por medio de la habilidad de conocer la secuencia ordenada de nucleótidos (adenina, guanina, citosina y timina) en el genoma. Estos avances tecnológicos siguen permitiendo a investigadores alrededor del mundo no solo aumentar el conocimiento actual sobre estructura y características de nuestro material genético, sino también abrir la puerta para el desarrollo de tecnologías transformativas como la medicina personalizada y la ingeniería genética.

Sin embargo, esta revolución en tecnologías de secuenciación de ADN ha traído consigo nuevos y numerosos retos, en particular en el manejo, el estudio y la interpretación de una gran cantidad de nuevos datos genómicos que deben ser analizados y transformados en conocimiento práctico y significativo, el cual puede ser implementado de forma útil en áreas como la agricultura, la biotecnología y la salud. Para este proceso, ha sido, y continua siendo, fundamental poder transformar los datos obtenidos por medio de la secuenciación de ADN en datos de funcionalidad de genes e identificación de elementos regulatorios; por ejemplo, para definir la función de un gen X en el desarrollo embrionario de un animal, su contribución en el desarrollo de procesos de enfermedad o su rol en la asignación de características fenotípicas como color de flor, tamaño de frutos o incluso en la determinación de estatura en seres humanos, etc.

La capacidad de editar la información genómica, o de regular su expresión de forma precisa, resulta esencial en los procesos de identificación y caracterización de elementos codificantes (genes que codifican para proteínas) y de elementos regulatorios en el ADN genómico, con lo cual se realiza su caracterización funcional (Hsu, Lander y Zhang, 2014). En términos de la regulación de la expresión de genes, la capacidad de “apagar” o “encender” la expresión de un gen ayuda a observar, en la mayoría de los casos, sus efectos fenotípicos y, además, por medio de fusiones génicas (a nivel de transcripción o traducción) que permiten la observación directa de la actividad del gen de interés.

Un ejemplo de lo anterior es la utilización de proteínas fluorescentes como elementos reporteros para realizar la visualización directa de la cantidad de una proteína X en una célula, empleando técnicas como la microscopía de fluorescencia. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que, en términos generales, la edición de genomas se refiere al proceso por medio del cual se pueden adicionar, remover o alterar elementos en la secuencia de ADN en posiciones específicas del cromosoma de un organismo (elementos que contienen el material genético en el núcleo de las células).

Figura 2. Áreas de aplicación de la ingeniería genómica

Fuente: imagen modificada de Hsu, Lander y Zhang (2014)

La habilidad de modificar el contenido genético de diversos organismos ha permitido una amplia gama de aplicaciones en distintas áreas de la biología, como en la biotecnología y la medicina (Figura 2). En el área de la biología, se emplean modelos celulares y animales, en los cuales las modificaciones genéticas o epigenéticas están dirigidas a investigar la función biológica o el fenotipo asociado al gen. En el área de la biotecnología, se ha desarrollado el mejoramiento de cultivos agrícolas, generando variedades de plantas de interés alimenticio resistentes a patógenos o a ambientes extremos. También en esta misma área se ha potencializado el desarrollo de nuevos materiales a partir de la manipulación de microorganismos, y actualmente se realiza la producción de biocombustibles gracias a la ingeniería de redes metabólicas eficientes en la producción de bioetanol.

En medicina, la edición de genomas hace posible el desarrollo de la terapia génica, por medio de la cual se pueden corregir mutaciones presentes en las células de un paciente que estén relacionadas con enfermedades genéticas. En esta área, también es importante destacar que la ingeniería genética ha permitido generar organismos genéticamente modificados (GMO, por sus siglas en inglés) para

la producción a escala industrial de medicamentos esenciales como la insulina, lo cual reduce significativamente el costo de la fabricación.

Aunque es importante recalcar que la ingeniería genética, durante las décadas recientes, ha realizado grandes avances en cada una de las aplicaciones ya mencionadas, el desarrollo de la metodología conocida como CRISPR/Cas9 ha generado una revolución en esta área, puesto que permite realizar edición de genomas de forma mucho más eficiente y sencilla, además de permitir la manipulación de ADN en diversos organismos. En este capítulo, presentaremos una breve introducción a la edición de genomas y al método CRISPR/Cas9, seguido de algunas de sus aplicaciones, los desafíos científicos y éticos relacionados con su implementación, y algunas consideraciones sobre el futuro de esta tecnología y su potencial impacto en la sociedad.

El nacimiento de la ingeniería genética

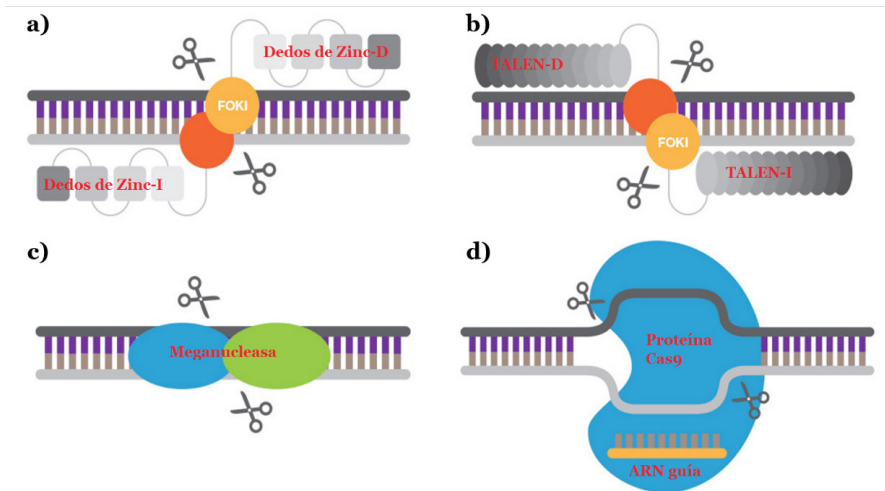
Varios avances de la última década han logrado el desarrollo de nuevas técnicas experimentales para la realización de edición y regulación de genomas de forma más sencilla y robusta. En general, los métodos para editar y regular de forma precisa el ADN genómico de un organismo requieren de una maquinaria molecular con al menos dos componentes principales que actúan en conjunto: i) un dominio (segmento funcional de una proteína) de reconocimiento y unión al ADN por medio del cual se codifica la especificidad de la región a editar; y ii) un dominio efector que se encarga de realizar la acción deseada en el genoma. El dominio efector puede ser una endonucleasa (enzima capaz de cortar el ADN) para realizar el clivaje en sitio específico del ADN o un factor de transcripción (proteína capaz de regular la expresión génica) para activar o inactivar la transcripción cerca de la región de reconocimiento (Wang, La Russa y Qi, 2016).

La generación de un corte en la doble cadena de ADN (DSB, por las siglas en inglés: *double-stranded break*), por medio de la actividad de una endonucleasa con alta especificidad, induce la activación de los mecanismos celulares de reparación de ADN, estimulando en gran medida la tasa de modificaciones génicas en la secuencia deseada (Rouet, Smih y Jasin, 1994b). Por esta razón, diversos métodos de edición genómica que emplean endonucleasas con sitios de reconocimiento específico han sido investigados e implementados en las últimas décadas (Hsu, Lander y Zhang, 2014). Uno de los primeros métodos de este tipo en ser desarrollado se basa en la utilización de unas proteínas conocidas como meganucleasas, las cuales fueron identificadas por primera vez en la década de los noventa.

Las meganucleasas (Figura 3) son enzimas que pertenecen a una clase de endonucleasas que reconocen una secuencia larga (entre catorce y cuarenta nucleótidos) en el ADN y catalizan el corte en su secuencia de reconocimiento (Rouet,

Smih y Jasin, 1994a). Los sitios de reconocimiento largos de estas enzimas hacen de las meganucleasas una herramienta altamente específica y robusta para la edición en genomas, debido a que entre más larga es la secuencia, existe una menor posibilidad de que esta se encuentre aleatoriamente en otra posición del genoma (la probabilidad de encontrar la secuencia aleatoriamente = tamaño del genoma / $4^{\text{Longitud de sitio de reconocimiento}}$). Sin embargo, las meganucleasas codifican su especificidad en su estructura proteica, y esto implica que para editar un nuevo sitio en el ADN genómico se requiere modificar racionalmente la secuencia y estructura de la proteína en un proceso altamente complejo; esto hace que el uso de meganucleasas en nuevos genes o regiones genómicas sea bastante limitado actualmente, pues resulta costoso y laborioso.

Figura 3. Cuatro principales métodos para la realización de genomas



Nota: representación esquemática de los cuatro principales métodos empleados para la realización de genomas y su funcionamiento a) las nucleasas con dedos de zinc (ZFN); b) las nucleasas tipo activadores de transcripción o TALEN, catalizan el corte en la doble cadena de ADN por medio de dos monómeros que actúan en conjunto, cada uno de los cuales emplea su dominio de reconocimiento (dedos de zinc o TALEN, respectivamente) para llevar al sitio de corte un monómero de la enzima FokI, que al encontrar otro monómero en su cercanía, se dimeriza y adquiere su función de nucleasa; c) las meganucleasas son enzimas que contienen ambas funciones, reconocimiento y clivaje del ADN, en su forma monomérica y catalizan el corte dentro de su sitio de reconocimiento; d) el sistema CRISPR/Cas9 emplea al ARN guía para codificar su sitio de reconocimiento, reclutando a la proteína Cas9 al sitio que se desea modificar y permitiendo que esta ejerza su función de nucleasa. El uso de proteínas similares a Cas9 permite generar silenciamiento o activación de expresión génica, en lugar de edición.

Fuente: figura modificada de Quinlan (2016)

En adición a las meganucleasas, otras tecnologías para la edición programable de genomas han sido desarrolladas e implementadas en las últimas décadas, entre las cuales se encuentran: i) las nucleasas con dedos de zinc —o ZFN, por sus siglas en inglés: *Zinc-Finger Nucleases*— (Kim, Cha y Chandrasegaran, 1996); y ii) las nucleasas tipo activadores de transcripción —o TALEN, por sus siglas en inglés: *Transcription Activator-Like Effector Nucleases*— (Boch *et al.*, 2009). En ambos sistemas, ZFN y TALEN, la maquinaria de edición funciona de forma similar a la que se describió antes, en la que el dominio de unión al ADN es el factor de transcripción específico de cada una de estas tecnologías, el cual está fusionado al dominio efector del corte; este último, en el caso de ambos sistemas, pertenece a la enzima de restricción FokI.

La implementación de FokI como dominio efector tiene la característica principal de ser un dímero obligado, lo cual implica que dos copias de FokI deben encontrarse en el mismo sitio del genoma, donde puedan interactuar (dimerización) y posteriormente generar el corte en el sitio deseado. Lo anterior permite que tanto ZFN como TALEN aumenten su especificidad al requerir dos sitios de reconocimiento flanqueantes al sitio de edición requerido para su actividad, lo cual disminuye la probabilidad de errores, entendidos como cortes en sitios no específicos (Figura 3, a y b). De forma similar a las meganucleasas, los métodos de ZFN y TALEN están actualmente limitados por el laborioso proceso de diseño y reingeniería requerido para editar diferentes sitios en el genoma, lo cual restringe su utilidad para estudios de alto rendimiento (Boch *et al.*, 2009; Kim, Cha y Chandrasegaran, 1996; Wang *et al.*, 2016).

El descubrimiento del sistema CRISPR/Cas9

El sistema de repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas o CRISPR (por sus siglas en inglés: *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) fue descubierto en 1993 en el microorganismo *Haloferax meterranei* por el Dr. Francisco Mojica en la Universidad de Alicante, en España, mientras realizaba su tesis doctoral analizando cambios en las propiedades del ADN de este organismo, relacionados con altas concentraciones de sales en su medio de cultivo (Lander, 2016; Mojica, Juez y Rodríguez-Valera, 1993). El trabajo le permitió al Dr. Mojica identificar en el cromosoma de esta arquea una secuencia palíndroma de aproximadamente treinta nucleótidos que se repite en tándem múltiples veces cada 36 nucleótidos. Este tipo de repeticiones consecutivas no se había reportado previamente en ningún microorganismo, lo cual despertó el interés del investigador, quien decidió dedicar su carrera a descubrir el misterio de estas repeticiones.

Para el año 2000, el Dr. Mojica, quien entonces era profesor e investigador en la Universidad de Alicante luego de haber realizado su entrenamiento posdoctoral en la Universidad de Oxford, había encontrado este tipo de repeticiones (conocidas desde entonces como CRISPR) en más de veinte microorganismos distintos, entre ellos importantes patógenos humanos como *Mycobacterium tuberculosis* (tuberculosis), *Clostridium difficile* (colitis) y *Yersinia pestis* (plaga).

Sin embargo, el descubrimiento de la función de estas repeticiones no se realizaría sino hasta el 2003 y no se publicó sino hasta el 2005. En su artículo en el *Journal of Molecular Evolution* del 2005, Mojica describió por primera vez que los elementos espaciadores en las repeticiones CRISPR, encontrados en los genomas de arqueas y bacterias, provenían de fuentes externas al cromosoma, y específicamente vendrían de los genomas de virus o plásmidos que suelen parasitar estas bacterias; entonces, propuso que CRISPR podría actuar como un sistema inmune adquirido en estos organismos para defenderse de la infección (Mojica, Díez-Villaseñor, García-Martínez y Soria, 2005).

La confirmación experimental del rol funcional de los elementos CRISPR como elementos de inmunidad adquirida fue publicada en el 2007 por el Dr. Philippe Horvath y su equipo; se pudo observar por primera vez en laboratorio la adquisición de nuevos elementos espaciadores en el genoma de la bacteria *Streptococcus thermophilus*, luego de que esta adquiriera resistencia contra bacteriófagos (virus que atacan bacterias) a los cuales antes era susceptible (Barrangou *et al.*, 2007).

El equipo del Dr. Horvath también identificó que la proteína asociada a CRISPR Cas7 (por sus siglas en inglés: CRISPR Associated Protein 7) es esencial para la adquisición de nuevas inmunidades, mientras que la proteína Cas9, que computacionalmente se predijo que presenta actividad enzimática de nucleasa, es requerida para “activar” la resistencia inmunológica. Además, este trabajo ayudó a descubrir que para mantener la resistencia se requiere homología completa entre la secuencia adquirida como elemento espaciador y el genoma del bacteriófago.

Estudios independientes, liderados por el Dr. John van Der Oost en Wageningen University (Holanda) y por el equipo del Dr. Luciano Marraffini y el Dr. Erik Sontheimer en Northwestern University (Chicago), permitieron identificar el mecanismo de acción del sistema CRISPR para conferir inmunidad adquirida a virus y plásmidos (Lander, 2016), esclareciendo que este sistema actúa por medio de la generación de cortes en el ADN del elemento foráneo, empleando a la proteína Cas9 para el clivaje y al ARN transcrito de las secuencias espaciadoras para conferir la especificidad de edición (Marraffini y Sontheimer, 2008; Sorek, Kunin y Hugenholtz, 2008).

Posteriormente, el equipo del Dr. Sylvain Moineau pudo identificar de forma precisa el mecanismo de la destrucción del ADN invasor, descubriendo que el corte en el ADN se realiza en la secuencia homóloga del elemento espaciador, tres nucleótidos cadena arriba de una secuencia asociada a las repeticiones de CRISPR denominada PAM (por sus siglas en inglés: *Proto-Spacer Adjacent Motif*). Así mismo, descubrieron que el número de cortes generados en el ADN está determinado por el número de secuencias espaciadoras homólogas al ADN invasor (Garneau *et al.*, 2010).

Hasta ese momento, el potencial de implementar este sistema de inmunidad adaptativa procariota como herramienta transformativa en la ingeniería genética no era más que una hipótesis (Marraffini y Sontheimer, 2008). Los primeros pasos para convertir esta posibilidad en una realidad fueron dados gracias al trabajo del Dr. Virginijus Siksnys en la Universidad de Vilnius (Lituania) y al equipo de la Dra. Emmanuelle Charpentier, el Dr. Jörg Vogel y la Dra. Jennifer Doudna, quienes lograron de forma independiente transferir efectivamente el sistema CRISPR de una bacteria (*S. thermophilus* y *S. pyogenes*, respectivamente) a la bacteria modelo *Escherichia coli*, demostrando así que todos los elementos necesarios y suficientes para su función habían sido identificados y recreando el sistema *in vitro* (Deltcheva *et al.*, 2011; Gasiunas, Barrangou, Horvath y Siksnys, 2012; Jinek *et al.*, 2012). Ambos grupos de investigadores en este punto demostraron de forma contundente el potencial impacto de la implementación del sistema CRISPR/Cas9 para aplicaciones biotecnológicas y en particular para la edición programable de genomas.

Tabla 1. Comparación de métodos comúnmente usados para la edición programable de genomas

	Meganucleasas	Dedos de zinc	TALENs	CRISPR/Cas9
Longitud de secuencia de reconocimiento	14-40 bp	18-36 bp por pareja de ZFN	28-40 bp por pareja de TALEN	19-22 bp
Especificidad de la secuencia de reconocimiento	Alta	Media-alta	Media-alta	Media
	Tolera algunos errores	Tolera algunos errores	Tolera algunos errores	Tolera varios errores
Incidencia de errores (<i>Off-target</i>)	Baja	Baja a moderada	Baja	Baja a moderada según secuencia del ARN guía

Limitaciones	Diseño de la enzima para reconocer sitios nuevos en el genoma es complicado	Difícil implementación en regiones del genoma ricas en guanina	Requiere la presencia de cinco timinas cerca del sitio deseado para editar	Requiere la presencia de región PAM cerca del sitio deseado para editar
Dificultad de diseño	Muy difícil	Difícil	Moderado	Fácil
Múltiples ediciones en simultáneo	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil
Dificultad para clonación e implementación <i>in vivo</i>	Fácil	Fácil	Moderada Su gran tamaño y uso de secuencias repetitivas limita los métodos de clonación	Fácil

Nota: la comparación entre los distintos métodos actuales para la edición de genomas se hizo en términos de su especificidad, facilidad de implementación y diseño.

Fuente: tabla modificada a partir de Quinlan (2016)

Los trabajos mencionados permitieron en conjunto demostrar que el sistema CRISPR/Cas9 posee una maquinaria molecular relativamente sencilla, en la cual las secuencias espaciadoras son originalmente transcritas a moléculas de ARN cortas (CFARNs) con la capacidad de guiar a Cas9 a sitios específicos en el genoma, donde aquella se une a este y genera su clivaje por medio de un corte en la doble cadena de ADN.

Con el objetivo de continuar desarrollando CRISPR/Cas9 como una herramienta editable, investigaciones posteriores realizadas por el Dr. Feng Zang y su equipo descubrieron cómo diseñar de forma sencilla lo que se conoce hoy en día como sgARN (ARN guía), por medio de la reingeniería del sistema original de secuencias espaciadoras y repeticiones que confiere la especificidad de corte, y así generar un sistema de solo dos componentes (la proteína Cas9 y el sgARN) capaz de editar múltiples sitios en genomas en células de diversos tipos y orígenes, incluidas células de mamíferos (Cong *et al.*, 2013).

En paralelo y de forma independiente, el equipo del Dr. George Church demostró el potencial de edición simultánea de varios genes en el genoma de células de mamíferos, facilitando la generación de nuevas líneas celulares y organismos genéticamente modificados en modelos animales como ratones y peces cebra (Mali *et al.*, 2013). Además, el sistema CRISPR es completamente modular, por lo cual es posible usar diferentes ARN guías (para editar varios sitios en el genoma para su edición) y diferentes variantes de la proteína Cas9 (u otras proteínas homólogas).

Emplear distintas proteínas efectoras en lugar de Cas9 permite generar de forma programable actividades distintas al corte/edición del genoma, como por ejemplo la activación o el silenciamiento de genes al emplear proteínas como dCas9 (en inglés, *death Cas9*), la cual ha sido modificada genéticamente para inactivar su actividad de nucleasa (requerida para realizar cortes en el ADN) y cambiar su función a la de un represor transcripcional.

Las aplicaciones de CRISPR/Cas9 y la revolución de la ingeniería genética

El desarrollo de CRISPR/Cas9 ha dado vía libre a grandes avances en la generación de organismos genéticamente modificados en múltiples tipos de células, como por ejemplo en la bacteria *Escherichia coli*, en el pez *Danio rerio* —pez cebra— y en el mamífero *Mus musculus* —ratón— (Li *et al.*, 2013; Pul *et al.*, 2010; Yin, Maddison y Chen, 2016). Estos GMO pueden construirse con casi cualquier tipo de modificación genética que no resulte en cambios letales en su ADN. Por ejemplo, es posible interrumpir los genes asociados con la resistencia a antibióticos en bacterias patógenas, o generar mutaciones en genes relacionados con el crecimiento y desarrollo del pez cebra (organismo modelo para el estudio de enfermedades neurodegenerativas y desarrollo embrionario), con el objetivo de estudiar con mayor detalle el desarrollo y la actividad cerebral del pez, y realizar importantes avances en el estudio de enfermedades como el Alzheimer.

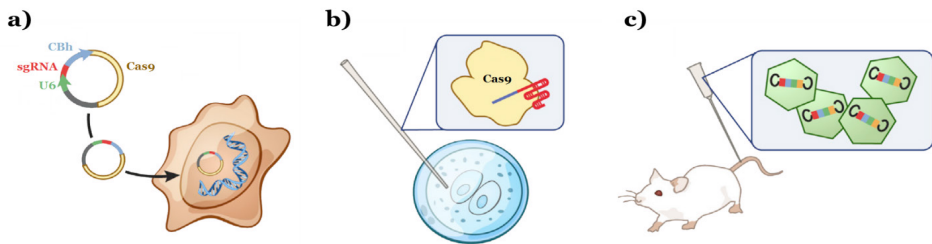
Como se mencionó en la sección anterior, el sistema CRISPR/Cas9 es extraordinario, debido a la simplicidad con la que permite editar cualquier secuencia en el ADN. En el caso de las bacterias, es posible generar nuevos GMO con solo introducir en la célula de interés un plásmido (vector de clonación) que contenga la secuencia de la proteína Cas9 y la de los ARN guías (sgRNA) diseñados para editar los genes de interés (Figura 4a). Dado que las bacterias son organismos que se reproducen de forma clonal, para generar una nueva población de GMO con las modificaciones de interés basta con editar una sola célula, que propaga de forma natural la mutación.

Por ejemplo, el microorganismo *Campylobacter jejuni*, una de las bacterias de gran relevancia médica por ser causante de infecciones gastrointestinales y neurológicas, ha sido editado con el objetivo de alterar la expresión de los genes involucrados en su virulencia, y de reducir su patogenicidad y entender mejor su proceso de infección (Louwen *et al.*, 2013). CRISPR/Cas9 también ha sido exitosamente implementado para silenciar los genes involucrados en la formación de biopelículas por *Pseudomonas aeruginosa*, las cuales son extremadamente difíciles de remover y generan grandes problemas y pérdidas económicas en la industria, así como

en implantes médicos, además de ser un importante mecanismo de virulencia para esta bacteria (Zegans *et al.*, 2009).

Si bien es cierto que desde el descubrimiento de CRISPR/Cas9 son muchos los estudios que han utilizado esta técnica para generar nuevas modificaciones genéticas y estudiar procesos metabólicos y genéticos que antes eran extremadamente difíciles de descifrar, es importante mencionar que hoy en día gran parte de la atención de la comunidad científica aún está dirigida a caracterizar y describir con mayor detalle este sistema. A su vez, también se están haciendo grandes esfuerzos para desarrollar nuevas y mejores estrategias y alternativas para la implementación del sistema CRISPR/Cas9, como el desarrollo de enzimas análogas a Cas9 que tengan mayor exactitud y precisión, y que además puedan editar o regular el ARN mensajero directamente para realizar la regulación controlada de la expresión de genes (Wang *et al.*, 2016).

Figura 4. Ingeniería genética del sistema Cas9



Nota: para generar perturbación en diferentes tipos de células a) en bacterias, el plásmido con la secuencia de Cas9 y el apropiado sg_{ARN} para editar el genoma pueden ser introducidos directamente a la célula; b) en cigotos fertilizados, Cas9 puede ser inyectado directamente a las células fertilizadas para causar la perturbación; y c) para ediciones somáticas, el sistema CRISPR/Cas9 puede ser transferido en el tejido o célula de interés

Fuente: figura modificada de Hsu, Lander y Zhang, (2014)

Durante décadas, la tecnología tradicional de edición de genomas ha tenido un rol fundamental en la generación de nuevos GMO en plantas cultivables de interés agrícola, cuyo objetivo ha sido asegurar la demanda mundial de alimentos por medio de la concepción de nuevas variedades resistentes a patógenos, a condiciones ambientales extremas o con mayor rendimiento en la producción de frutos. Sin embargo, desde la publicación en el 2013 de los primeros estudios que demostraban el potencial del sistema CRISPR/Cas9 para la generación de modificaciones en el genoma de plantas (Feng *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2014; J. F. Li *et al.*, 2013), se abrió la posibilidad de usar esta técnica para el desarrollo de nuevos cultivos transgénicos.

Uno de los primeros estudios con que se demostró la viabilidad de usar CRISPR/Cas9 para generar mutantes en plantas se basó en la modificación de genes involucrados en el crecimiento, la pigmentación y la morfología de las hojas de *Arabidopsis thaliana* (organismo modelo de plantas con flores) y de *Oryza sativa* (arroz), en lo que se logró probar que el 50 % de las plantas transgénicas presentaba las características fenotípicas esperadas, como crecimiento lento, decoloración y ondulaciones en las hojas (Feng *et al.*, 2013); también permitió comprobar la alta eficiencia de CRISPR/Cas9 para generar, de forma simultánea, múltiples modificaciones en los genomas de las plantas estudiadas. A partir de este trabajo, nuevos estudios están dirigidos a validar e implementar el sistema CRISPR/Cas9 en diferentes especies de plantas, a mejorar su eficacia y a evaluar la estabilidad y heredabilidad de las mutaciones en la línea germinal obtenidas usando esta técnica.

Si bien es cierto que el sistema CRISPR/Cas9 ha potencializado la generación de GMO por su maquinaria sencilla y por su relativa facilidad de utilización; cabe resaltar que las otras metodologías mencionadas antes para la edición de genomas, varias de las cuales utilizan la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* como vector o método de inserción a las células vegetales, han sido también implementadas de forma exitosa en plantas. Así lo demuestra el estudio de Y. Wang *et al.* (2014), en el que se emplearon los métodos de TALEN y CRISPR/Cas9 para generar variedades de trigo (*Triticum aestivum*) resistentes al moho, permitiendo de esta forma la generación de plantas resistentes a las enfermedades de mildiú polvoriento por medio de la edición del gen MLO —en inglés: *Mildew Resistance Locus*— (Wang *et al.*, 2014).

Sin embargo, el avance acelerado en la generación de GMO de plantas de interés agrícola por medio de la implementación del sistema CRISPR/Cas9 (Tabla 2) ha abierto el debate sobre la legislación de estos nuevos cultivos genéticamente modificados y su seguridad para el consumo humano. En este sentido, dentro del marco normativo europeo, las plantas de cultivo genéticamente modificadas usando CRISPR/Cas9 podrían ser clasificadas de manera diferente a las legislaciones ya existentes para otros tipos de cultivos transgénicos. Esto último se debe a que, según este marco de referencia, dos plantas idénticas producidas por diferentes métodos de ingeniería genética se consideran diferentes en términos de su regulación, dado que la legislación se centra en el proceso implementado para la realización de la modificación genética y no en el producto (Hartung y Schiemann, 2014; Po-devin *et al.*, 2013). En el caso de la regulación de este tipo de cultivos en Estados Unidos, el pasado 3 de abril del 2018 el Departamento de Agricultura anunció su decisión de no clasificar en su categoría de cultivos genéticamente modificados a los cultivos generados usando CRISPR/Cas9 (Haridy, 2018). Lo anterior ha desatado una gran polémica, debido a que si bien CRISPR/Cas9 es una metodología teóricamente poco invasiva y segura, aún faltan estudios que investiguen y demuestren de

forma contundente que realmente estos cultivos no generan ningún riesgo para el consumo humano.

Tabla 2. Ejemplos de algunos de los cultivos de interés agrícola que han sido editados usando CRISPR/Cas9

Cultivo	Mejoramiento por edición con CRISPR/Cas9	Referencia
Arroz	Resistencia al hongo <i>Magnaporthe oryzae</i> , causante de la enfermedad conocida como piriculariosis o quemazón del arroz	(Wang <i>et al.</i> , 2016)
Trigo	Resistente al hongo causante de mildéu polvoriento que genera la pudrición de hojas y tallos.	(Wang <i>et al.</i> , 2014)
Tomate	Mejoramiento en la maduración del fruto	(Ito <i>et al.</i> , 2015)
Soya	Resistencia al herbicida chlorsulfuron utilizado en el control de maleza	(Li <i>et al.</i> , 2015)
Maíz	Mejoramiento de fruto	(Li <i>et al.</i> , 2015)

Fuente: elaboración propia

Dos de las áreas de aplicación de la ingeniería genómica más importantes, y potencialmente más controversiales, son la medicina y las áreas afines a la salud humana, en las que la edición del material genético de líneas celulares humanas o de modelos animales no solo permite la generación de novedosos y eficientes métodos para el desarrollo de nuevos medicamentos, sino que también da vía libre al estudio de enfermedades genéticas complejas y abre la posibilidad de corregir mutaciones en el ADN relacionadas con trastornos genéticos, por medio de la llamada terapia génica (Hsu, Lander y Zhang, 2014). De forma similar a las áreas de la salud, la versatilidad y facilidad de implementar el sistema CRISPR/Cas9 para la generación de ediciones en el genoma de células de mamíferos y células humanas genera un panorama prometedor para el estudio de la diabetes, enfermedades cardíacas, la esquizofrenia y el autismo, e incluso enfermedades altamente complejas como el cáncer y enfermedades infecciosas como el VIH (Hsu, Lander y Zhang, 2014; Okee *et al.*, 2018).

En las décadas recientes, la medicina ha empleado el uso de líneas celulares generadas por medio del aislamiento de células de algunos mamíferos y de humanos, como en el caso de la famosa línea celular HeLa (células tumorales aisladas por medio de una biopsia del cáncer cervical de Henrietta Lacks) que fue plataforma para investigar diversas enfermedades humanas complejas (Cho *et al.*, 2013; Koike-Yusa *et al.*, 2014; Shalem, Sanjana y Zhang, 2015). En este contexto, el poder del sistema CRISPR/Cas9 para generar modificaciones en múltiples genes de

forma simultánea en el genoma de estas células (proceso que antes era altamente ineficiente, complejo y laborioso) ofrece un panorama alentador para realizar estudios que permitan entender con claridad el rol de los múltiples genes involucrados en diversas y complejas redes genéticas y metabólicas asociadas al desencadenamiento de enfermedades, lo cual favorece las investigaciones dirigidas a desarrollar terapias más efectivas, incluso el descubrimiento de curas.

En adición a la modificación genética de células somáticas (no germinales) de diversos organismos adultos y de líneas celulares, el sistema CRISPR/Cas9 está siendo actualmente implementado en la modificación genética de embriones, lo cual ha enfatizado la importancia de evaluar las implicaciones éticas de la generación de animales transgénicos debido a la gran aceleración en la producción de embriones GMO usando esta técnica. Similar al proceso en células de organismos unicelulares, la implementación del sistema CRISPR/Cas9 en embriones se puede llevar a cabo de forma relativamente sencilla por medio de la inyección directa (por lo general codificado en un plásmido) en cigotos fertilizados. Una vez dentro del cigoto, el sistema CRISPR/Cas9 es expresado y se efectúa la edición deseada en los cromosomas de interés (Figura 4b y 4c), proceso que se ha realizado de forma exitosa en diferentes animales modelo, entre ellos ratones, pez cebra y primates; además, se ha demostrado la eficiente transmisión de estas modificaciones a la descendencia de estos organismos transgénicos (Hwang *et al.*, 2013; Niu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2013; Yin, Maddison, Chen, 2016). A modo de ejemplo, en un estudio reciente realizado en ratones, se logró introducir al mismo tiempo modificaciones en cinco genes ubicados en distintas zonas del genoma, obteniendo una eficiencia de hasta el 80 % (Wang *et al.*, 2013).

La implementación del sistema CRISPR/Cas9 en medicina ha potencializado la generación de avances extraordinarios, en particular en el conocimiento de enfermedades complejas, generando un panorama alentador para el desarrollo de novedosos tratamientos y medicamentos más eficientes. Sin embargo, a pesar del gran rango de aplicaciones que tiene CRISPR/Cas9 en medicina y en muchas otras disciplinas, la comunidad científica necesita aún resolver muchas incógnitas en cuanto a la fidelidad y seguridad de la aplicación de CRISPR/Cas9, en particular para aplicaciones *in vivo* en seres humanos y en la generación de modificaciones genéticas en embriones.

Conclusiones

El área de la ingeniería genética ha avanzado a pasos agigantados desde la revolución generada en 1973 por el descubrimiento de tecnologías que permiten la recombinación del ADN. El potencial de editar el contenido genético de una célula ha dado vía libre, en menos de cincuenta años, a generar grandes avances en el

conocimiento de cómo está organizado el material genético de un organismo, de cómo la información contenida en el ADN se codifica y de cómo esta controla el funcionamiento de las células de bacterias, animales, plantas e incluso humanos. Recientemente, se han desarrollado diversas tecnologías para la edición genómica, como meganucleasas, ZFN, TALEN y finalmente el sistema CRISPR/Cas9, las cuales han posibilitado la manipulación del ADN de diversos microorganismos y organismos con múltiples aplicaciones en biología, biotecnología y medicina, entre otras.

El descubrimiento del sistema CRISPR/Cas9 para la edición de genomas, desde el momento en que este sistema fue reportado por primera vez como un elemento misterioso presente en el genoma de un microorganismo, pasando por los grandes esfuerzos multidisciplinarios realizados para identificar su función y sus mecanismos de acción, hasta su desarrollo como una poderosa y versátil herramienta capaz de revolucionar por completo la investigación en diversas áreas de la ingeniería genética, la biotecnología y la medicina, sirve como un recordatorio de la gran importancia que tiene la investigación en ciencias básicas.

Las cuatro características principales del sistema CRISPR/Cas9 que lo convierten en una plataforma revolucionaria (precisión, efectividad, simplicidad y versatilidad) han permitido una aceleración extraordinaria en la construcción de nuevos organismos y líneas celulares genéticamente modificadas, con aplicaciones diversas como la generación de: i) bacterias capaces de producir eficientemente fármacos y hormonas para su uso en humanos, ii) plantas de interés agrícola con mayor rendimiento en la producción de frutos, y iii) modelos animales para el estudio de enfermedades complejas en humanos.

Debido a este aceleramiento en la producción de GMO, es importante evaluar de forma profunda y trabajar en generar las consideraciones y regulaciones éticas imprescindibles en la aplicación extensiva de modificaciones genéticas en organismos, y en particular de la implementación del sistema CRISPR/Cas9 en estudios y tratamientos en seres humanos o en productos para su consumo. Actualmente, las regulaciones legales y éticas están en proceso de revisión en el caso puntual de los organismos transgénicos generados usando CRISPR/Cas9, debido a que este sistema es poco invasivo y por lo tanto se reducen los riesgos de efectos secundarios no deseados. Sin embargo, si bien la incidencia de errores y modificaciones genómicas inespecíficas al usar el sistema CRISPR/Cas9 es mucho menor con respecto a otros métodos de edición de genomas, es importante continuar analizando otros posibles riesgos en su implementación, sobre todo debido a su potencial para la generación de embriones genéticamente modificados en humanos.

Referencias

- Barrangou, R., Fremaux, C., Deveau, H., Richards, M., Boyaval, P., Moineau, S., ... Horvath, P. (2007). CRISPR Provides Acquired Resistance Against Viruses in Prokaryotes. *Science*, 315(5819), 1709-1712. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1138140>
- Boch, J., Scholze, H., Schornack, S., Landgraf, A., Hahn, S., Kay, S., ... Bonas, U. (2009). Breaking the Code of DNA Binding. *Science*, 326(5959), 1509-1512. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1178811>
- Cho, S. W., Kim, S., Kim, J. M. y Kim, J.-S. (2013). Targeted Genome Engineering in Human Cells With the Cas9 RNA-Guided Endonuclease. *Nature Biotechnology*, 31(3), 230-232. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2507>
- Cong, L., Ran, F. A., Cox, D., Lin, S., Barretto, R., Habib, N., ... Zhang, F. (2013). Multiplex Genome Engineering Using CRISPR/Cas Systems. *Science*, 339(6121), 819-823. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1231143>
- Crick, F. (1970). Central Dogma of Molecular Biology. *Nature*, 227(6), 6-8. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1038/227561a0>
- Deltcheva, E., Chylinski, K., Sharma, C. M., Gonzáles, K., Chao, Y., Pirzada, Z. A., ... Charpentier, E. (2011). CRISPR RNA Maturation by Trans-Encoded Small RNA and Host Factor RNase III. *Nature*, 471(7340), 602-607. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature09886>
- Feng, Z., Zhang, B., Ding, W., Liu, X., Yang, D. L., Wei, P., ... Zhu, J. K. (2013). Efficient Genome Editing in Plants Using a CRISPR/Cas System. *Cell Research*, 23(10), 1229-1232. DOI: <https://doi.org/10.1038/cr.2013.114>
- Garneau, J. E., Dupuis, M. È., Villion, M., Romero, D. A., Barrangou, R., Boyaval, P., ... Moineau, S. (2010). The CRISPR/cas Bacterial Immune System Cleaves Bacteriophage and Plasmid DNA. *Nature*, 468(7320), 67-71. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature09523>
- Gasiunas, G., Barrangou, R., Horvath, P. y Siksnys, V. (2012). Cas9-crRNA Ribonucleoprotein Complex Mediates Specific DNA Cleavage for Adaptive Immunity in Bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(39), E2579-E2586. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1208507109>
- Haridy, R. (2018). USDA Confirms it Won't Regulate CRISPR Gene-Edited Plants Like it Does GMOS. *New Atlas*. Recuperado de <https://newatlas.com/usda-will-not-regulate-crispr-gene-edited-plants/54061/>
- Hartung, F. y Schiemann, J. (2014). Precise Plant Breeding Using New Genome Editing Techniques: Opportunities, Safety and Regulation in the EU. *Plant Journal*, 78(5), 742-752. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.12413>

- Hsu, P. D., Lander, E. S. y Zhang, F. (2014). Development and Applications of CRISPR-Cas9 for Genome Engineering. *Cell*, 157(6), 1262-1278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>
- Hwang, W. Y., Fu, Y., Reyon, D., Maeder, M. L., Kaini, P., Sander, J. D., ... Yeh, J. R. J. (2013). Heritable and Precise Zebrafish Genome Editing Using a CRISPR-Cas System. *PLoS ONE*, 8(7). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068708>
- Ito, Y., Nishizawa-Yokoi, A., Endo, M., Mikami, M. y Toki, S. (2015). CRISPR/Cas9-Mediated Mutagenesis of the RIN Locus that Regulates Tomato Fruit Ripening. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 467(1), 76-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.09.117>
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J. A. y Charpentier, E. (2012). A Programmable Dual-RNA Guided DNA Endonuclease in Adaptive Bacterial Immunity. *Science*, 337(6096), 816-821. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Kim, Y. G., Cha, J. y Chandrasegaran, S. (1996). Hybrid Restriction Enzymes: Zinc Finger Fusions to Fok I Cleavage Domain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(3), 1156-1160. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.93.3.1156>
- Koike-Yusa, H., Li, Y., Tan, E. P., Velasco-Herrera, M. del C. y Yusa, K. (2014). Genome-Wide Recessive Genetic Screening in Mammalian Cells with a Lentiviral CRISPR-Guide RNA Library. *Nature Biotechnology*, 32(3), 267-273. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2800>
- Lander, E. S. (2016). The Heroes of CRISPR. *Cell*, 164(1-2), 18-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.12.041>
- Li, J., Aach, J., Norville, J. E., McCormack, M., Bush, J., Church, G. M. y Sheen, J. (2014). Multiplex and Homologous Recombination-Mediated Plant Genome Editing via Guide RNA/Cas9, *Nature Biotechnology*, 31(8), 688-691. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2654>
- Li, J. F., Norville, J. E., Aach, J., McCormack, M., Zhang, D., Bush, J., ... Sheen, J. (2013). Targeted Mutagenesis in the Model Plant *Nicotiana benthamiana* Using Cas9 RNA-Guided Endonuclease. *Nature Biotechnology*, 31(8). DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2654>
- Li, W., Teng, F., Li, T. y Zhou, Q. (2013). Simultaneous Generation and Germline Transmission of Multiple Gene Mutations in Rat Using CRISPR-Cas Systems. *Nature Biotechnology*, 31(8), 684-686. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2652>
- Li, Z., Liu, Z.-B., Xing, A., Moon, B. P., Koellhoffer, J. P., Huang, L., ... Cigan, A. M. (2015). Cas9-Guide RNA Directed Genome Editing in Soybean. *Plant Physiology*, 169(2), 960-970. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.15.00783>

- Louwen, R., Horst-Kreft, D., De Boer, A. G., Van der Graaf, L., De Knecht, G., Hamersma, M., ... Van Belkum, A. (2013). A Novel Link Between *Campylobacter jejuni* Bacteriophage Defence, Virulence and Guillain-Barré Syndrome. *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 32(2), 207-226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10096-012-1733-4>
- Mali, P., Yang, L., Esvelt, K. M., Aach, J., Guell, M., DiCarlo, J. E., ... Church, G. M. (2013). RNA-Guided Human Genome Engineering via Cas9. *Science*, 339(6121), 823-826. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1232033>
- Marraffini, L. A. y Sontheimer, E. J. (2008). CRISPR Interference Limits Horizontal Gene Transfer in *Staphylococci* by Targeting DNA. *Science*, 322(5909), 1843-1845. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1165771>
- Mojica, F. J. M., Díez-Villaseñor, C., García-Martínez, J. y Soria, E. (2005). Intervening Sequences of Regularly Spaced Prokaryotic Repeats Derive from Foreign Genetic Elements. *Journal of Molecular Evolution*, 60(2), 174-182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00239-004-0046-3>
- Mojica, F. J. M., Juez, G. y Rodríguez-Valera, F. (1993). Transcription at Different Salinities of *Haloferax Mediterranei* Sequences Adjacent to Partially Modified PstI Sites. *Molecular Microbiology*, 9(3), 613-621. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.1993.tb01721.x>
- Niu, Y., Shen, B., Cui, Y., Chen, Y., Wang, J., Wang, L., ... Sha, J. (2014). Generation of Gene-Modified Cynomolgus Monkey via Cas9/RNA-Mediated Gene Targeting in One-Cell Embryos. *Cell*, 156(4), 836-843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.01.027>
- Podevin, N., Davies, H. V., Hartung, F., Nogué, F. y Casacuberta, J. M. (2013). Site-Directed Nucleases: A Paradigm Shift in Predictable, Knowledge-Based Plant Breeding. *Trends in Biotechnology*, 31(6), 375-383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.004>
- Pul, Ü., Wurm, R., Arslan, Z., Geißen, R., Hofmann, N. y Wagner, R. (2010). Identification and Characterization of *E. coli* CRISPR-Cas Promoters and their Silencing by H-NS. *Molecular Microbiology*, 75(6), 1495-1512. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2010.07073.x>
- Quinlan, A. (2016). Different Ways of Gene Editing. Bioradiations. Recuperado el 2 de abril del 2018, de <http://www.bioradiations.com/from-megatals-to-crispr-the-many-ways-to-edit-a-gene/>
- Rager Fuller, N. (2012). Biology Research Overview. NSF - National Science Foundation. Recuperado el 6 de abril del 2018, de <https://www.nsf.gov/news/overviews/biology/interactive.jsp>

- Rouet, P., Smih, F. y Jasin, M. (1994a). Expression of a Site-Specific Endonuclease Stimulates Homologous Recombination in Mammalian Cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(13), 6064-6068. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.13.6064>
- Rouet, P., Smih, F. y Jasin, M. (1994b). Introduction of Double-Strand Breaks into the Genome of Mouse Cells by Expression of a Rare-Cutting Endonuclease. *Molecular and Cellular Biology*, 14(12), 8096-8106. DOI: <https://doi.org/10.1128/MCB.14.12.8096>
- Shalem, O., Sanjana, N. E. y Zhang, F. (2015). High-Throughput Functional Genomics Using CRISPR-Cas9. *Nature Reviews Genetics*, 16(5), 299-311. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrg3899>
- Sorek, R., Kunin, V. y Hugenholtz, P. (2008). CRISPR — A Widespread System that Provides Acquired resistance against Phages in Bacteria and Archaea. *Nature Reviews Microbiology*, 6(3), 181-186. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1793>
- Svitashev, S., Young, J. K., Schwartz, C., Gao, H., Falco, S. C. y Cigan, A. M. (2015). Targeted Mutagenesis, Precise Gene Editing, and Site-Specific Gene Insertion in Maize Using Cas9 and Guide RNA. *Plant Physiology*, 169(2), 931-945. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.15.00793>
- Wang, F., Wang, C., Liu, P., Lei, C., Hao, W., Gao, Y., ... Zhao, K. (2016). Enhanced Rice Blast Resistance by CRISPR/Cas9-Targeted Mutagenesis of the ERF Transcription Factor Gene OSERF922. *PLoS ONE*, 11(4), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154027>
- Wang, H., La Russa, M. y Qi, L. S. (2016). CRISPR/Cas9 in Genome Editing and Beyond. *Annual Review of Biochemistry*, 85(1), 227-264. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060815-014607>
- Wang, H., Yang, H., Shivalila, C. S., Dawlaty, M. M., Cheng, A. W., Zhang, F. y Jaenisch, R. (2013). One-Step Generation of Mice Carrying Mutations in Multiple Genes by CRISPR/Cas-Mediated Genome Engineering. *Cell*, 153(4), 910-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2013.04.025>
- Wang, Y., Cheng, X., Shan, Q., Zhang, Y., Liu, J., Gao, C. y Qiu, J. L. (2014). Simultaneous Editing of Three Homoeoalleles in Hexaploid Bread Wheat Confers Heritable Resistance to Powdery Mildew. *Nature Biotechnology*, 32(9), 947-951. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2969>
- Yin, L., Maddison, L. A. y Chen, W. (2016). Multiplex Conditional Mutagenesis in Zebrafish using the CRISPR/Cas System. *Methods in Cell Biology* (Vol. 135). DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.mcb.2016.04.018>

Zegans, M. E., Wagner, J. C., Cady, K. C., Murphy, D. M., Hammond, J. H. y O'Toole, G. A. (2009). Interaction Between Bacteriophage ϕ MS3 and Host CRISPR Region Inhibits Group Behaviors of *Pseudomonas Aeruginosa*. *Journal of Bacteriology*, 97(1), 210-219. DOI: <https://doi.org/10.1128/JB.00797-08>

El futuro de la informática

Juan Guillermo Lalinde-Pulido

Resumen

Según la Real Academia Española (RAE, 2014), la *informática* se define como “conjunto de conocimientos científicos y técnicas que hacen posible el tratamiento automático de la información por medio de computadoras”. Estos conocimientos y técnicas han posibilitado que se desarrolle la sociedad del conocimiento, transformando no solo la forma como nos relacionamos, sino también la forma como se comprende el mundo. ¿Por qué hablar del futuro de la informática y no del futuro de la computación? Computación e informática son dos formas diferentes de referirse a los mismos conceptos (RAE, 2014). En este capítulo, se reflexionará sobre el estado actual de la informática, la relación entre la informática y las ciencias de la información, y se explorarán posibles escenarios futuros.

Palabras clave: ciencias de la información, computación, informática, sociedad del conocimiento

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Lalinde-Pulido, J. G. (2019). El futuro de la informática. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 129-150). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.5>

The Future of Information Technology

Juan Guillermo Lalinde-Pulido

Abstract

According to the Real Academia Española (RAE, 2014), information technology is defined as “a set of scientific and technical knowledge that makes possible the automatic processing of information through computers”. These knowledge and techniques have made possible the development of the knowledge society, which has transformed not only the way we relate to each other, but also the way we understand the world. Why talk about the future of information technology and not the future of computing? Information technology and computing are two different ways of referring to the same concepts (RAE, 2014). In this chapter, we will reflect on the current state of information technology, the relationship between information technology and the information sciences, and explore possible future scenarios.

Keywords: information science, computing, information technology, knowledge society

Introducción

Una tecnología fundamental para el desarrollo de la globalización es la informática y, a su vez, la globalización le plantea nuevos retos. Este capítulo presenta el desarrollo y el estado actual de la informática para analizar su impacto en la sociedad del conocimiento e identificar nuevos retos. Primero, se define la informática, se presentan sus orígenes y su desarrollo actual, luego se presentan las nuevas formas de computación y se concluye especulando sobre el futuro de la informática.

Origen y desarrollo de la informática

Para poder hablar del futuro de la informática, es muy importante tener una visión de dónde viene y de cómo se ha llegado al nivel actual de desarrollo. En general, los conocimientos y las técnicas a las que hace referencia la definición de la informática han surgido como consecuencia natural del desarrollo científico. Para efectos de la reflexión propuesta, se considerarán dos aspectos que tradicionalmente se han denominado *software* y *hardware*. El *hardware* es el equipo computacional (RAE, 2014), mientras que el *software* son los programas y las instrucciones de cómo se debe llevar a cabo la tarea (RAE, 2014). Sin embargo, estos dos aspectos van mucho más allá. El *hardware* puede ser entendido como el equipo de procesamiento de información, mientras que el *software* son las instrucciones de cómo se debe procesar la información. Como se verá más adelante, hay una relación estrecha entre *hardware* y *software*, pues el *software* debe estar especificado en términos de las operaciones de procesamiento de información que puede llevar a cabo el *hardware*.

Si bien los orígenes de la informática pueden remontarse a épocas tan antiguas como la invención del ábaco, aproximadamente en el 3000 a. C. (Carlson et al., 2012), la informática moderna surge cuando se desarrollan modelos teóricos de procesamiento de información a comienzos del siglo xx. Uno de los trabajos más importantes es el desarrollo de la máquina de Turing, modelo abstracto de computación que es la base de la informática, propuesto por Alan Turing (1937). Si bien el objetivo de este capítulo no es presentar a fondo la teoría de la informática, sí es

necesario identificar los componentes fundamentales de la teoría de la informática para poder especular sobre su futuro.

En primer lugar, hay que hacer referencia al *Entscheidungsproblem* propuesto por Hilbert. Este problema, denominado en español *problema de la decisión*, se refiere a la existencia de un algoritmo que reciba una fórmula lógica de primer orden y determine automáticamente si es o no es un teorema. Las raíces de este problema se pueden rastrear a la décima pregunta formulada también por Hilbert en 1900, en el Congreso Internacional de Matemáticos en París, sobre la posibilidad de encontrar un algoritmo que determine si una ecuación 'diofántica polinómica' dada con coeficientes enteros tiene solución entera. Lo más importante de estas preguntas, pensando en el futuro de la informática, es que en ellas se plantea la existencia de un algoritmo que pueda resolver de manera automática cualquier instancia del problema planteado. Esto conduce a preguntarse por tres conceptos que rondan el mundo de la informática y que llevan a esbozar preguntas muy profundas no solo sobre el funcionamiento y el alcance de las tecnologías de la información y las comunicaciones, sino incluso sobre la naturaleza misma del ser humano y la estructura del universo. Por el momento, basta con precisar cuáles son estos conceptos y más adelante se retomarán en la reflexión.

La definición formal de *algoritmo* está íntimamente relacionada con los modelos computacionales. De manera informal, se puede decir que un algoritmo es una colección finita de pasos no ambiguos que en un tiempo finito producen un resultado. En primer lugar, cuando se habla de pasos no ambiguos, se hace referencia a que no se requiere ningún conocimiento para efectuar el paso. Está definido de tal manera que no hay espacio para diversas interpretaciones ni otras formas de realizarlo. Su ejecución es determinista y no implica ningún tipo de conocimiento, y menos conciencia, por parte del ejecutante. En segundo lugar, se habla de una colección finita de pasos. Esto ubica la informática inmediatamente en el mundo de las matemáticas discretas. Por último, el resultado se obtiene en un tiempo finito.

La pregunta de fondo que surge, entonces, es si todo problema puede ser resuelto mediante un algoritmo o no. No es difícil ver la similitud de esta pregunta con el *problema de la decisión*. La respuesta a esta pregunta es negativa: no todo problema puede ser resuelto mediante un algoritmo. Es importante resaltar que la pregunta no se corresponde con la capacidad computacional disponible, es decir que no se preocupa por cuánto tardaría ni cuánta memoria sería necesaria. La única condición, derivada de la definición de algoritmo, es que este debe terminar en un tiempo finito. Una de las demostraciones de que hay problemas para los cuales no existe solución algorítmica es el famoso *problema de la parada* para el cual, de manera independiente, Turing (1937) y Church (1936) demostraron que no existe ningún algoritmo que lo resuelva.

Este problema está ligado con el teorema de la incompletitud de Gödel (1965), formulado originalmente en 1931 y reimpresso en 1965. Dicho teorema afirma que todo sistema lógico, que sea suficientemente “complejo” como para representar operaciones aritméticas, es incompleto en el sentido de que hay proposiciones que no son ‘decidibles’. Una manera informal de ilustrarlo es la siguiente: dada la expresión “*esta frase es falsa*”, determine si es falsa o verdadera. Si se supone que la frase es verdadera, quiere decir que lo enunciado es verdadero y por lo tanto la frase es falsa, lo cual es una contradicción. Si se supone que la frase es falsa, quiere decir que lo enunciado es falso y por lo tanto la frase es verdadera, lo cual nuevamente es una contradicción. Este problema es indecidible porque no hay forma de decidir si la frase es falsa o verdadera. Cualquier valor de verdad que se le asigne conduce a una contradicción. El teorema de Gödel tiene el mismo significado que el problema de la parada: hay problemas, de hecho, infinitos problemas, que no tienen solución algorítmica.

Este tema es de fundamental relevancia porque plantea una limitación teórica que va a ser central en el desarrollo de la informática en su forma actual, y va a conducir a preguntas esenciales sobre el universo y la sociedad. Más aún, el desarrollo detallado de la demostración muestra la importancia de que la informática es una forma de matemáticas discretas. El concepto crucial que ha de tenerse claro es que no todos los problemas se pueden resolver algorítmicamente.

Esta última es una limitación de carácter teórico. Ahora, ¿qué pasa en la práctica? Aparece una segunda limitante. Como si no fuera suficiente que existieran problemas que no pueden ser resueltos algorítmicamente, se tiene una segunda restricción dada por aquellos problemas para los cuales se conoce un algoritmo que los resuelve, pero que tarda tanto tiempo o requiere tantos recursos que no es útil. A los problemas que no se pueden resolver en la práctica pese a tener solución algorítmica se les denomina ‘no tratables’. Este tema es tan importante que uno de los problemas del milenio en matemáticas está directamente relacionado con él. El problema está asociado con la dificultad intrínseca para resolver un problema¹.

Ahora, al pasar al plano del *hardware*, es innegable que el crecimiento de la capacidad de cómputo ha sido exponencial. La denominada Ley de Moore (Schaller, 1997), formulada por Gordon E. Moore, fundador de Intel, es una ley empírica que afirma que aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores de un procesador. Gracias a los desarrollos tecnológicos, se ha logrado la reducción del espacio requerido por los transistores, lo cual ha permitido que la capacidad computacional disponible para un usuario también crezca de manera exponencial. Un

1 Se puede encontrar una descripción apropiada del problema, sin mucho detalle técnico, en Devlin (2002). La formulación oficial del problema está disponible en Cook (2000).

procesador actual es miles de veces más rápido que los primeros procesadores que se fabricaron en los ochenta. Para entender qué significa esto, lo que en 1980 podía demorar una hora de cómputo actualmente se puede hacer en un segundo. Ahora, en la última década la velocidad efectiva de los procesadores no ha aumentado. La estrategia que han seguido los fabricantes de procesadores es incrementar el número de unidades de procesamiento por procesador. Esto ha implicado un cambio de paradigma en el desarrollo de *software*, pues la única forma de hacer uso eficiente de los recursos computacionales modernos es utilizando algoritmos paralelos, es decir que pueden realizar varias operaciones simultáneamente.

Hay un tercer elemento que es importante en el desarrollo de la computación: la información. Las tecnologías de la información y las comunicaciones utilizan máquinas que implementan modelos computacionales, *hardware*, para ejecutar programas, *software*, que procesan información. Este tercer elemento cobra importancia central en un momento en el cual se han desarrollado tecnologías que permiten capturar datos masivamente, almacenarlos y procesarlos. Esto ha dado origen a las ciencias de los datos. A diferencia de la aproximación estadística, en la que se asume que los datos son producidos siguiendo una distribución de probabilidad, probablemente desconocida, en las ciencias de los datos se trata de aprender a partir de ellos (Breiman, 2001; Donoho, 2015).

El principal referente teórico para estudiar la información es el trabajo *A Mathematical Theory of Information* de Claude Shannon (1947). A partir de esta teoría, se han desarrollado las tecnologías de la información y las comunicaciones que han transformado el mundo. Las preguntas iniciales estaban asociadas con la capacidad de un canal de comunicaciones y la codificación de las fuentes. La primera se refiere a cuánta información se puede transmitir por unidad de tiempo por el canal y la segunda se refiere a cómo representar la información de manera que, incluso en presencia de ruido, no se altere su significado. Esto ha permitido desarrollar tecnologías que permiten capturar datos mediante sensores, almacenarlos, transmitirlos, procesarlos y modificar el entorno mediante actuadores.

Entre los desarrollos tecnológicos derivados de dicha teoría están: i) los mecanismos de comunicación, siendo Internet el más importante, que transportan información en tiempo real; y ii) el desarrollo de formatos y técnicas de manipulación de información que permiten representar digitalmente, es decir, mediante unos y ceros, los datos y la información que se utiliza para apoyar los procesos de toma de decisiones. Es por esto que hoy en día hablamos de *sistemas ciberfísicos*, definidos como aquellos sistemas que involucran sistemas de control sofisticados que capturan información del mundo físico y la procesan para decidir cómo actuar para que el sistema funcione apropiadamente (Das, Kant y Zhang, 2012). No sobra resaltar que los procesos actuales de transformación digital, entre los cuales se incluyen la

noción de ciudades inteligentes (Chourabi *et al.*, 2012) e industrias 4.0 (Rüßmann *et al.*, 2015), surgen al tratar de aprovechar todos estos desarrollos para mejorar los procesos de toma de decisiones en las diferentes organizaciones.

Así las cosas, luego de una evolución de más de setenta años, el desarrollo de la informática se caracteriza por un crecimiento exponencial tanto en capacidad de cómputo y almacenamiento, como en velocidad de transmisión de la información. Las tecnologías de moda están relacionadas con los nuevos retos que trae ese crecimiento. Internet de las cosas (Xia *et al.*, 2012) —conocido como IoT: *Internet of things*— se refiere a los desarrollos de sensores y actuadores que permiten a los sistemas informáticos interactuar con el mundo real y que, además, están en capacidad de transmitir vía Internet los datos obtenidos en esa interacción para que sean procesados y responder a los cambios en el entorno. La analítica, denominada *big data* por las características especiales de su procesamiento, se refiere a almacenar todos los datos que se puedan recolectar sobre un problema o situación y tomar con ellos las respectivas decisiones (Provost y Fawcett, 2013).

Muchos de los problemas que hay que resolver para analizar los datos son problemas que caen en la categoría de problemas no tratables: aunque tienen solución algorítmica exacta, esta no es útil por la cantidad de recursos necesarios. Es acá donde aparecen las técnicas de *aprendizaje de máquinas* (Zdeborová, 2017), herramientas basadas en la inteligencia artificial que tratan de encontrar las mejores soluciones posibles a un problema mediante la estimación automática de los parámetros de un modelo matemático. Temas como ciudades inteligentes surgen cuando se utilizan IoT y analítica para capturar y procesar información sobre el funcionamiento de la ciudad de modo que se puedan tomar decisiones que faciliten el bienestar de los ciudadanos.

Las tecnologías informáticas posibilitan la transformación digital, pero no la garantizan. La informática se refiere a los conocimientos y las tecnologías de procesamiento de información, así que para poder incorporar tecnologías informáticas, es necesario repensar los problemas y los procesos en términos de procesamiento de información. La incorporación de la informática en todos los aspectos de la sociedad obliga a cambiar la forma de pensar, de manera que conceptos como procesamiento de información, y especialmente los algoritmos, pasan a ser herramientas fundamentales para desenvolverse apropiadamente en la nueva sociedad del conocimiento.

Nuevas formas de computación

La revisión del origen y desarrollo de la informática muestra dos preguntas sobre las que se debe profundizar. La primera, que se tratará en esta sección, está relacionada con el desarrollo de nuevas tecnologías que incrementen la capacidad

de procesamiento de información. La segunda está vinculada a la forma como la informática genera nuevas herramientas para tratar de entender el mundo que nos rodea, y se desarrollará en la siguiente sección.

Antes de hablar de nuevas formas de computación, es importante definir de manera precisa qué es *información*. Para ello, se utilizarán las definiciones de dato e información que presenta Luciano Floridi (2010). *Dato* se define como falta de uniformidad. Nótese que esta definición de dato no requiere la existencia de un agente que identifique la falta de uniformidad. Basta con la ausencia de uniformidad para decir que hay un dato. Ahora, la definición general de información exige que esta tenga contenido semántico y se da cuando: (i) hay una colección de datos (ii) que están bien formados y (iii) es significativa. La única restricción sobre la colección de datos es que no puede ser vacía, es decir que debe ser al menos un dato.

Ahora, si esto es información, ¿qué es procesamiento de información? Dogig-Crnkovic (2015) describe cómo el realismo estructural informativo, propuesto por Floridi (2008), puede ser la base para la construcción de agentes procesadores de información, y define *procesamiento de información* como toda actividad computacional que la transforme o toda transmisión de información. Ahora, un tema para la reflexión: los algoritmos que procesan información interpretan la información a partir de la regla de formación exigida en el literal (ii) de la definición. Uno de los retos grandes en informática es dar un paso adicional y hacer que la computación misma sea significativa.

El hecho de que el procesamiento de información se haga mediante algoritmos, y que estos sean una colección finita de pasos no ambiguos que en un tiempo finito produce un resultado, plantea una pregunta fundamental que, como se verá en la siguiente sección, cuestiona incluso la definición misma de inteligencia. Según esto, los algoritmos no *entienden significados*, sino que procesan datos bien formados. Esto lleva a la pregunta sobre la realidad de ese tercer literal en la definición de información y aquí será retomado al hablar de la informática como ciencia básica y su relación con las demás áreas del conocimiento.

Las definiciones de *dato*, *información* y *procesamiento de información* muestran la relación tan estrecha que hay entre la definición de algoritmo y el procesamiento de información. En la sección sobre el origen y desarrollo de la informática, se definieron tres pilares básicos: modelo (*hardware*), programa (*software*) e información. Esto quiere decir que las nuevas formas de computación que se están proponiendo deben implementar nuevos modelos computacionales que, probablemente, lleven a nuevas formas de programar para procesar información. A fin de introducir algunos modelos nuevos de computación, es útil explicar de manera sucinta el modelo computacional que se ha utilizado hasta el momento.

Los computadores, la materialización del modelo abstracto de la *máquina de Turing* (Turing, 1937), se consideran máquinas de propósito general. Esto quiere decir que son máquinas que se pueden programar para ejecutar cualquier algoritmo. Se dice que un modelo computacional es un modelo universal si su funcionamiento puede ser simulado con una máquina de Turing. Esto se basa en la tesis de Church-Turing sobre las funciones computables. Dicha tesis señala que una función sobre los números naturales es computable mediante un algoritmo si y solo si es computable por una máquina de Turing (Center for the Study of Language and Information, 1997). Esta tesis asocia la definición de procedimiento computable con la máquina de Turing y por esa razón esta última se toma como base para definir los modelos universales de computación. Se han tratado de encontrar modelos que tengan mayor capacidad computacional que una máquina de Turing y se denominan *hipercomputación*. Sin embargo, Martin Davis (2004) muestra que estas aproximaciones no son viables debido a la incapacidad que tienen todas las teorías físicas aceptadas actualmente para manejar números reales de precisión infinita.

Las tecnologías computacionales existentes están basadas en compuertas lógicas digitales. George Boole, lógico y matemático británico del siglo XIX, propuso el álgebra booleana (Boole, 1847), que utiliza técnicas algebraicas para manipular expresiones de lógica proposicional. El desarrollo de la electrónica digital, en la cual la información está codificada en estados discretos, permitió la construcción de compuertas digitales que implementan las operaciones del álgebra booleana. Si a esto se une el hecho de que el álgebra booleana puede ser utilizada para implementar operaciones aritméticas, se tiene el origen de los computadores electrónicos digitales que han predominado en el mundo de la informática.

Aunque la computación ha crecido de manera exponencial, muchos problemas que tienen solución algorítmica no pueden ser resueltos en la práctica debido a la forma como crece la necesidad de recursos a medida que aumenta el tamaño del problema. Hay varios tipos de problemas que son de especial interés. En primer lugar, están los problemas que pertenecen a la clase de complejidad NP . Intuitivamente, las clases de complejidad permiten identificar qué tan difícil es resolver un problema tomando como referente cómo se incrementa el tiempo de ejecución del algoritmo más eficiente que lo resuelve cuando se incrementa el tamaño del problema. Los NP son una familia particular de problemas caracterizados por el hecho de que los algoritmos más eficientes que se conocen para encontrar una solución exacta son de orden exponencial, aunque determinar la validez de una solución se puede hacer en tiempo polinomial (Tucker, 2004). Esto quiere decir que hay que evaluar todas las combinaciones posibles para poder resolverlo.

Los problemas NP son importantes porque aparecen con mucha frecuencia en procesos de optimización. Otros problemas están relacionados con problemas

matemáticos que son de difícil resolución pero que no pertenecen a la categoría NP, como es el caso de la factorización de números enteros. Estos son particularmente importantes porque muchas técnicas criptográficas están basadas en la dificultad de resolver dichos problemas.

Dada la importancia de estos problemas, se han explorado modelos computacionales alternativos. Si bien estos modelos no son modelos hipercomputacionales, es decir que no pueden resolver mediante algoritmos problemas que no pueden ser resueltos por una máquina de Turing, sí ofrecen alternativas nuevas para resolver problemas no tratables. Los modelos computacionales que más se han desarrollado en los últimos años son la computación biológica y la computación cuántica.

Un elemento importante a tener en cuenta: al modificar el modelo computacional, hay que ajustar los algoritmos, pues cambian las operaciones que pueden ser realizadas. Sin embargo, el *programador* de estos sistemas no tiene que ser un experto en la tecnología que soporta la computación. Basta con entender las operaciones que pueden ser realizadas y formular los algoritmos utilizando estas operaciones. Al igual que se puede programar un computador sin necesidad de saber de electrónica digital y semiconductores, los computadores biológicos y cuánticos pueden ser programados utilizando los operadores propios de cada modelo. Cuando se habla de un modelo computacional cuántico o biológico, es porque se construyó un modelo matemático teórico y se ha demostrado que las operaciones que soporta el modelo permiten construir algoritmos en el mismo sentido que se definen en la máquina de Turing. También, hay que tener presente que esto no descarta que se puedan desarrollar tecnologías que sean útiles para resolver ciertos tipos de problemas, pero que no sean modelos computacionales universales.

La computación biológica se basa en el descubrimiento de que las células almacenan información en un mecanismo similar a la memoria, se comportan siguiendo reglas estrictas, similares a la programación, en respuesta a estímulos, y pueden desarrollar operaciones a grandes velocidades. Por tanto, es natural que se busquen formas de transformar o construir células que lleven a cabo tareas de procesamiento de información específicas. Adleman (1994) utilizó herramientas de la biología molecular para resolver una instancia del problema del camino hamiltoniano en un grafo dirigido. Adleman utilizó moléculas de ADN para representar el grafo y las operaciones fueron realizadas utilizando enzimas y protocolos estándar. Es importante resaltar que el problema resuelto por Adleman es un problema NP-completo; es decir que además de la gran dificultad que tiene el problema, que lo ubica en la categoría NP, tiene la propiedad de que una solución a este puede ser utilizada para resolver cualquier problema NP mediante una transformación de orden polinomial.

La ventaja que presenta la computación biológica es el alto nivel de paralelismo y la gran capacidad de almacenamiento de información. De hecho, en la aproximación utilizada por Adleman, el paralelismo masivo permite reducir sustancialmente el tiempo de ejecución, pero el almacenamiento requerido crece de forma exponencial. El trabajo de Adleman se considera el punto de quiebre que permitió a la computación biológica pasar de la teoría a la práctica. Es una prueba de concepto de que la computación biológica es viable, lo que dio gran impulso a la investigación científica para desarrollarla.

El MIT ha sido uno de los institutos líderes mundiales en el desarrollo de la computación biológica. En el 2016 desarrollaron y validaron un *framework* para implementar máquinas de estado que registran y responden a todas las identidades y órdenes de los eventos reguladores de genes en células vivas (Roquet *et al.*, 2016). Aunque las ‘máquinas de estado’ son modelos computacionales más limitados que una máquina de Turing, esto es, no son universales, sí muestran que se pueden llevar a cabo computaciones efectivas con computación biológica y abren el camino para desarrollos futuros (Adleman, 1994). La computación biológica es diferente de la computación tradicional, siendo la eficiencia energética una de sus características más interesantes. Dado que cada día cobra más importancia el consumo energético de los dispositivos computacionales, la computación biológica se convierte en una alternativa muy interesante que debe ser desarrollada y explotada adecuadamente.

Otro tipo de computación que ha pasado de la teoría a la realidad es la computación cuántica. Sus orígenes se remontan a la célebre conferencia de Richard Feynman en 1959, *There is Plenty of Room at the Bottom* (Feynman, 1961). En ella, Feynman menciona la posibilidad de utilizar efectos cuánticos para computar. Una de las primeras ideas para utilizar efectos cuánticos en procesamiento de información fue la propuesta por Wiesner en los sesenta, publicada en 1983, sobre el uso de información cuántica para crear billetes infalsificables. Posteriormente, se han producido varios trabajos sobre la dificultad de simular con eficiencia sistemas cuánticos utilizando computación tradicional, especialmente debido al principio de superposición. En 1981, en la conferencia *First Conference on the Physics of Computation*, Feynman (1982) propuso un modelo básico para llevar a cabo computaciones cuánticas.

Si bien la motivación de Feynman estaba relacionada con la simulación eficiente de sistemas cuánticos, en el fondo aparece nuevamente el problema de la complejidad computacional asociada con ciertos problemas. El principio de superposición se refiere a que en el mundo cuántico un objeto puede estar en varios estados al mismo tiempo (Miller, 2008). Ahora, desde el punto de vista de la informática, esto implica que el número de estados crece de forma exponencial y pone

a la simulación de los sistemas cuánticos en la categoría de problemas difíciles computacionalmente.

En los sistemas computacionales tradicionales, la unidad de información es el *bit*, cuyo nombre proviene de abreviar la expresión inglesa *binary digit*. Si utilizamos la definición de dato como falta de uniformidad (Floridi, 2010), es fácil ver que el número mínimo de estados necesarios es dos para que pueda haber falta de uniformidad. Así, en la computación tradicional si se utilizan n bits, se pueden representar 2^n estados diferentes.

La unidad de representación de información en la computación cuántica es el *qubit*, abreviación de la expresión inglesa *quantum bit*. Al igual que los bits tradicionales, el qubit puede tener dos estados que se denominan $|1\rangle$ y $|0\rangle$. Sin embargo, a diferencia de los bits tradicionales, un qubit puede estar en *ambos estados a la vez*. Esto se debe al principio de superposición. La idea de la computación cuántica es utilizar operadores que permitan realizar operaciones sobre los qubits en las cuales se transforman los estados superpuestos, pero sin producir el colapso de la función de onda. El colapso de la función de onda se refiere al hecho de que, a pesar de que una partícula esté en varios estados superpuestos a la vez, siempre encontramos que está en un estado específico al tratar de medirla (Miller, 2008).

Mientras que en la computación tradicional n bits representan *uno* de los 2^n estados posibles, en la computación cuántica n qubits están en 2^n estados diferentes al mismo tiempo. Cada operación que se aplique a n qubits está transformando simultáneamente 2^n estados al mismo tiempo. Esto hace pensar no solo en la posibilidad de simular sistemas cuánticos, sino también en resolver problemas de optimización que son NP. De hecho, la computación cuántica se está utilizando para resolver problemas de muchas áreas del conocimiento (Mohseni, Read y Neven, 2017), siendo una de las más destacadas la optimización financiera.

Ahora, utilizar un computador cuántico para resolver un problema implica desarrollar algoritmos utilizando un modelo computacional diferente. Una de las aproximaciones más exitosas para resolver problemas utilizando la computación cuántica es mapear el problema a uno de optimización binaria cuadrática no restringida (Kochenberger *et al.*, 2014; Lewis y Glover, 2017), conocida en inglés como *quadratic unconstrained binary optimization* (QUBO), y su posterior mapeo en una arquitectura cuántica (Perdomo-Ortiz *et al.*, 2015) para su solución. El *framework* más natural para la solución de problemas de optimización combinatorios es el *quantum annealing* (Perdomo-Ortiz *et al.*, 2017), traducido en español como *recocido cuántico* o *algoritmo del temple cuántico*, y es por esto que los problemas deben ser transformados para poder ser atacados con computación cuántica.

Lo anterior lleva a plantear dos temas importantes para el futuro de la informática: en primer lugar, la computación cuántica ha dejado de ser una posibilidad teórica y se ha convertido en una realidad. Si bien desde el punto de vista teórico no implica capacidades de hipercomputación, en la práctica sí representa un paso muy importante para que problemas que antes no se consideraban tratables pasen a ser considerados tratables.

En segundo lugar, la computación cuántica no solo abre la posibilidad de resolver problemas que no eran tratables, sino que también ha obligado a modificar los esquemas de protección criptográfica de información. El primer algoritmo cuántico que se formuló fue para resolver el problema de la factorización de números enteros y fue propuesto por Peter Shor (1994). Varios de los esquemas de cifrado más utilizados se basan en el supuesto de que problemas como la factorización de un número entero y el cálculo del logaritmo discreto en un grupo son muy difíciles de resolver. Con el algoritmo de Shor y la computación cuántica, esta dificultad desaparece y con ella, toda la protección de los esquemas criptográficos basados en problemas matemáticos que con la computación cuántica pasan de no tratables a tratables. Esto ha dado origen a una nueva serie de herramientas criptográficas que se denominan *criptografía poscuántica* (Bernstein, 2009). El tema está tan desarrollado que incluso el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías de Estados Unidos), tiene un proyecto para la estandarización de la criptografía poscuántica (NIST, 2017).

Estos desarrollos muestran que los avances de la informática no solo están transformando la sociedad, sino que además están obligando a repensar los principios fundamentales de la informática misma y de la ciencia en general.

La informática, la ciencia y la sociedad

La informática, también conocida como ciencias de la computación, surgió a mediados del siglo xx. Su objeto de estudio se comenzó a definir a partir de los trabajos pioneros de Turing (1937), Shannon (1947) y Gödel (1965), entre otros, y se centró en el estudio de los procesos computacionales. Inicialmente, se planteó como una rama de la matemática, pero con el tiempo se hizo evidente que las ciencias de la computación eran diferentes de la ingeniería y de la matemática (Denning, 2007). Más aún, su desarrollo ha conducido a formular conceptos teóricos que la hacen única y se posiciona como una ciencia básica que debe ser presentada a todos los estudiantes desde la formación básica.

Desde la propuesta de Wing (2006) sobre el pensamiento computacional, la necesidad de incorporar las ciencias de la computación, y en particular el pensamiento computacional, en la educación básica ha sido presentada por diversos

autores (Borchardt y Roggi, 2017; Caspersen *et al.*, 2018; Jiménez y Cerdas, s. f.; Lucero, 2003; Sanders, 2009). Estas ideas han conducido a la formulación de un currículo de ciencias de la computación denominado CSTA K-12 (Computer Science Teachers Association [CSTA], 2017), desarrollado de manera conjunta por ACM y la Computer Science Teachers Association. Lo que se busca es que todo ciudadano, independientemente de su ocupación o su profesión, tenga la formación básica en ciencias de la computación para poder ser parte de la sociedad de la información.

Según Floridi (2010), estamos viviendo una cuarta revolución que ha transformado no solo la sociedad, sino también la concepción de lo que implica ser humano. De acuerdo con Floridi, la primera gran revolución fue la de Copérnico: el heliocentrismo; en esta, se mostraba que el mundo no era el centro del universo, ya que la Tierra gira alrededor del Sol, y en consecuencia, el hombre no era el centro del universo. La segunda revolución fue la Darwin: la evolución biológica; en esta, se mostró que las especies biológicas, incluidos los seres humanos, eran el resultado de un proceso evolutivo gradual y que no había una creación explícita de las especies que habitan la Tierra. La consecuencia incómoda de esta revolución fue que el hombre no era el resultado de una creación explícita, sino de un proceso evolutivo. La tercera revolución fue la de Freud, que está asociada con las ciencias cognitivas y las neurociencias: estamos muy lejos de ser esas mentes aisladas enteramente transparentes a nosotros mismos. Nuestro sistema nervioso condiciona nuestro comportamiento. Finalmente, la cuarta revolución fue la de Turing, la revolución de la información, que nos llevó a entender que no somos seres aislados, sino organismos informacionales, *infoborgs*, interconectados que compartimos con entidades biológicas y artefactos artificiales un entorno global que finalmente está hecho de información: la *infosfera*.

El postulado de Floridi conduce a pensar que al hablar del futuro de la informática, no solo se habla del posible desarrollo de una tecnología para el procesamiento de información, sino que además se habla del futuro mismo de la humanidad. Autores como Harari (2015) analizan aquello que representan los avances de la informática para el desarrollo de la humanidad, mientras que Goodman (2015) hace un recuento de cómo el crimen se ha transformado por el uso de la tecnología.

Que la informática ha permitido desafiar la estructura social tradicional es un hecho. Por un lado, está la noción de *brecha digital* (*digital gap*), que identifica las dificultades para acceder a la informática y a las comunicaciones como un factor de inequidad (Robles, 2017). Por otro lado, basta con tener acceso a la informática para poder generar transformaciones radicales. Tal vez el ejemplo más claro de este potencial es la *bitcoin* como un sistema que permite el manejo de pagos en línea comportándose cual si fuera una moneda sin la intervención de ninguna institución del sistema financiero (Nakamoto, 2008). Por su naturaleza, la *bitcoin* se ha conver-

tido en un mecanismo anónimo que permite realizar transacciones comerciales en la red, garantizando las mismas propiedades que se dan en las transacciones con dinero en efectivo en el mundo físico.

Ahora bien, independientemente de toda la discusión que hay sobre la *bitcoin* como moneda, sobre sus bondades y sobre sus posibilidades de mantenerse, desde el punto de vista de la informática lo más importante es que con la *bitcoin* se desarrolló el *blockchain*, una nueva tecnología que abre posibilidades antes nunca pensadas. Si bien el funcionamiento de *blockchain* es complejo desde el punto de vista matemático, no lo es desde el punto de vista del usuario. Para el usuario, solo son importantes las propiedades que se garantizan cuando se utiliza el *blockchain*; no se preocupa por cómo se garantizan siempre y cuando haya certeza de que efectivamente se cumplen.

El *blockchain* es como tener un libro de registros contables distribuido, en el que muchos usuarios pueden registrar transacciones con la certeza de que el contenido del libro nunca va a ser alterado y de que las transacciones realizadas son aceptadas por todos los miembros del *blockchain*. Este mecanismo es un gran logro de la informática, pues permite construir consenso sobre transacciones sin la necesidad de que exista una autoridad central que dirima los conflictos. Esta propiedad no solo es útil en una criptomoneda, como es el caso de la *bitcoin*, sino que también tiene muchas aplicaciones prácticas, como por ejemplo la protección de la privacidad de la información personal (Zyskind, Nathan y Pentland, 2015).

En las nuevas versiones del *blockchain*, aparece un componente adicional denominado ‘contratos inteligentes’, un programa que se ejecuta en el *blockchain* y cuya ejecución correcta está garantizada por el protocolo de consenso (Luu *et al.*, 2016). De esta manera, los miembros del *blockchain* pueden interactuar de manera confiable en un sistema que está regido por el consenso construido entre todos los miembros, instaurando un marco legal propio y estable que permite el desarrollo de actividades sin la necesidad de supervisión de un tercero neutral.

Estas propiedades hacen revolucionaria la tecnología del *blockchain* no solo por el tipo de aplicaciones que se han desarrollado, sino además porque transforma radicalmente la forma de interacción entre los distintos agentes que forman parte del *blockchain*. Hay una interacción basada en la confianza que se genera por contar con un esquema de funcionamiento que garantiza que los consensos son inalterables y nadie puede negar su participación en una transacción. Es por esta razón que muchas empresas están viendo en el uso del *blockchain* una muy buena alternativa para reducir la fricción del mercado, entendida como cualquier cosa que dificulte el intercambio de activos (Manav Gupta, 2017).

Otra tecnología que está transformando la sociedad es la inteligencia artificial, especialmente lo relacionado con el aprendizaje de máquinas. Aunque esta tecnología se comenzó a desarrollar hace más de sesenta años, en los últimos años ha tomado mucha fuerza con el desarrollo del aprendizaje profundo o *deep learning* (LeCun, Bengio y Hinton, 2015). La gran cantidad de aplicaciones exitosas basadas en esta tecnología, entre las que destacan la visión artificial, el procesamiento de lenguaje natural y los sistemas autónomos, también plantea serios interrogantes sobre su impacto en la sociedad. Es importante tener presente que en los desarrollos tecnológicos hay que considerar múltiples aspectos. Hankin *et al.* (2018) presentan recomendaciones para el desarrollo de sistemas que toman decisiones de manera automática que son clasificadas en seis categorías: técnicas, éticas, legales, económicas, sociales y educativas. Por su parte, la Asociación de Estándares IEEE (2018) ha creado un comité que lidera la iniciativa global sobre la ética de los sistemas autónomos e inteligentes, generando un espacio para la reflexión acerca del impacto de este tipo de tecnologías en la sociedad.

El futuro de la informática

En resumen, se podría decir que los últimos avances en la informática no solo solucionan problemas, sino que asimismo plantean preguntas sobre el impacto de la informática en la sociedad. Estas preguntas deben ser analizadas por la sociedad en general, ya que van mucho más allá del potencial que tienen estas tecnologías para resolver problemas y que de por sí cuestionan el futuro mismo de la sociedad.

No se podría hablar del futuro de la informática sin analizar el impacto de su desarrollo en la ciencia. La informática ha impactado la forma como comprendemos el mundo, cuestionando cómo muchas de las ciencias tradicionales ven el mundo. Actualmente, se puede afirmar que tanto la física cuántica, como la biología y las neurociencias están migrando hacia ciencias basadas en información. Davis y Gregersen (2014) presentan varios ensayos en los que se analiza cómo la nueva concepción de la información, derivada del desarrollo de la informática, ha transformado la física, la biología, las neurociencias e incluso la teología.

Es difícil predecir cuál va a ser el futuro de la informática. El nuevo paradigma del procesamiento de la información está permeando toda actividad humana y es necesario entender cuál es el potencial y las limitantes que tiene dicha tecnología. ¿Hasta dónde puede llegar la tecnología? Y más importante aún, ¿hasta dónde *debe* llegar la tecnología? Estas son preguntas abiertas. De la forma como se aborde su estudio va a depender el futuro de la informática.

Lo que sí se puede afirmar es que la informática será cada día más ubicua, es decir que las tecnologías de la información están disponibles en cualquier momento

y en cualquier lugar. Predominarán los servicios *inteligentes*, que utilizan la información del usuario y del entorno en que se encuentra para ofrecerle soluciones. Esto implicará la necesidad de incrementar la capacidad de cómputo y la velocidad de la transmisión de datos, pero teniendo en cuenta las implicaciones ambientales de estos nuevos desarrollos. Proliferarán los centros de procesamiento, ecológicamente sostenibles y conectados a altas velocidades, que permitirán a los usuarios utilizar sus dispositivos móviles como terminales para acceder a los diferentes servicios. Ahora, la recolección y el procesamiento de información estarán condicionados por la normatividad que se desarrolle con el fin de garantizar un balance adecuado entre la privacidad de las personas y la seguridad de la información. En otras palabras, el desarrollo futuro de la informática debe mantener un sano equilibrio entre la eficiencia, el consumo energético y su impacto en la sociedad.

Referencias

- Adleman, L. (1994). Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems. *Science*, 266(5187), 1021-1024. doi: <http://doi.org/10.1126/science.7973651>
- Bernstein, D. J. (2009). Introduction to Post-Quantum Cryptography. En D. J. Bernstein, J. Buchmann y E. Dahmen (Eds.), *Post-Quantum Cryptography* (pp. 1-14). Berlín: Springer Berlin Heidelberg. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-540-88702-7_1
- Boole, G. (1847). *The Mathematical Analysis of Logic: Being an Essay Towards a Calculus of Deductive Reasoning*. Londres: Forgotten Books.
- Borchardt, M. y Roggi, I. (2017). *Ciencias de la computación en los sistemas educativos de América Latina*. Bogotá: Ministerio de Educación.
- Breiman, L. (2001). Statistical Modeling: The Two Cultures. *Statistical Science*, 16(3), 199-231. Recuperado de <https://projecteuclid.org/euclid.ss/1009213726>
- Carlson, B., Burgess, A., Miller, C. y Bauer, L. (2012). *Timeline of Computing History*. IEEE's Computer Society. Recuperado de <https://www.computer.org/cms/Computer.org/Publications/timeline.pdf>
- Caspersen, M. E., Gal-Ezer, J., Mcgettrick, A. y Nardelli, E. (2018). *Informatics for All: The Strategy*. Londres: AMC Europe Council.
- Center for the Study of Language and Information (1997). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford: Stanford University Press. Recuperado de <https://plato.stanford.edu/entries/church-turing/#ThesHist>
- Chourabi, H., Nam, T., Walker, S., Gil-García, J. R., Mellouli, S., Nahon, K., ... Scholl, H. J. (2012). Understanding Smart Cities: An Integrative Framework. En *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 2289-2297). doi: <http://doi.org/10.1109/HICSS.2012.615>

- Church, A. (1936). An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory. *American Journal of Mathematics*, 58(2), 345-363. doi: <http://doi.org/10.2307/2371045>
- Cook, S. (2000). *The P versus NP Problem*. Clay Mathematical Institute. doi: <http://doi.org/10.1145/1562164.1562186>
- Computer Science Teachers Association (CSTA) (2017). CSTA K-12 Computer Science Standards, Revised 2017. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/0B0TIX1G-3mywqbXpydGdIVk00Y1U>
- Das, S. K., Kant, K. y Zhang, N. (2012). *Handbook on Securing Cyber-Physical Critical Infrastructure*. Nueva York: Elsevier.
- Davis, M. (2004). The Myth of Hypercomputation. En C. Teuscher (Ed.), *Alan Turing: Life and Legacy of a Great Thinker* (pp. 195-211). Berlín: Springer Berlin Heidelberg. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-662-05642-4_8
- Davis, P. y Gregersen, N. H. (Eds.). (2014). *Information and the Nature of Reality*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Denning, P. J. (2007). Computing is a Natural Science. *Communications of the ACM*, 50(7), 13. doi: <http://doi.org/10.1145/1272516.1272529>
- Devlin, K. J. (2002). *The Millennium Problems: The Seven Greatest Unsolved Mathematical Puzzles of Our Time*. Nueva York: Basic Books.
- Dodig-Crnkovic, G. (2015). Floridi's Informational Structural Realist Basis for Info-Computational Modelling of Cognizing Agents. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 27(1), 13-22. doi: <http://doi.org/10.1080/0952813X.2014.940140>
- Donoho, D. (2015). *50 Years of Data Science*. Recuperado de <http://courses.csail.mit.edu/18.337/2015/docs/50YearsDataScience.pdf>
- Feynman, R. P. (1961). There is Plenty of Room at the Bottom. En H. D. Gilbert (Ed.), *Miniaturization*. Nueva York: Reinhold.
- Feynman, R. P. (1982). Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6-7), 467-488. doi: <http://doi.org/10.1007/BF02650179>
- Floridi, L. (2008). A Defence of Informational Structural Realism. *Synthese*, 161(2), 219-253. doi: <http://doi.org/10.1007/s11229-007-9163-z>
- Floridi, L. (2010). *Information. A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- Gödel, K. (1965). On Formally Undecidable Propositions of Principia Mathematica and Related Systems I. En M. Davis (Ed.), *The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvability Problems and Computable Functions* (pp. 5-38). Mineola: Dover.

- Goodman, M. (2015). *Future Crimes. Inside the Digital Underground and the Battle for Our Connected World*. Londres: Random House.
- Hankin, C., Carson, S. G., Crafa, S., Grau, O., Kirchner, C., Knowles, B., ... Tamburri, D. A. (2018). *When Computers Decide: European Recommendations on Machine-Learning Automated Decision Making*. Londres: AMC Europe Council.
- Harari, Y. N. (2015). *Homo Deus. Breve historia del mañana*. Nueva York: Penguin Random House.
- IEEE Standard Association (2018). *The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems*. Recuperado de https://standards.ieee.org/develop/indconn/ec/autonomous_systems.html
- Jiménez, M. y Cerdas, R. J. (s. f.). *La robótica educativa como agente promotor del estudio por la ciencia y la tecnología en la región atlántica de Costa Rica*. Madrid: OEI.
- Kochenberger, G., Hao, J. K., Glover, F., Lewis, M., Lü, Z., Wang, H. y Wang, Y. (2014). The Unconstrained Binary Quadratic Programming Problem: A Survey. *Journal of Combinatorial Optimization*, 28(1), 58-81. doi: <http://doi.org/10.1007/s10878-014-9734-0>
- LeCun, Y. A., Bengio, Y. y Hinton, G. E. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. doi: <http://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lewis, M. y Glover, F. (2017). *Quadratic Unconstrained Binary Optimization Problem Preprocessing: Theory and Empirical Analysis*. Wiley Online Library. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/net.21751/full>
- Lucero, M. M. (2003). Entre el trabajo colaborativo y el aprendizaje colaborativo. *Revista Iberoamericana de Educación*, 33(1), 1-21.
- Luu, L., Chu, D.-H., Olickel, H., Saxena, P. y Hobor, A. (2016). Making Smart Contracts Smarter. En *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security CCS'16* (pp. 254-269). doi: <http://doi.org/10.1145/2976749.2978309>
- Manav Gupta. (2017). *Blockchain for Dummies, IBM Limited Edition*. Recuperado de <https://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=XIM12354USEN>
- Mohseni, M., Read, P. y Neven, H. (2017). *Commercialize early quantum technologies*. *Nature*, 543, 171-174. doi: <http://doi.org/10.1038/543171a>
- Miller, D. A. B. (2008). *Quantum Mechanics for Scientists and Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <http://doi.org/10.1017/CBO9780511813962>
- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2017). *Post-Quantum Cryptography Standardization — Post-Quantum Cryptography* | CSRC. Recuperado el 28 de mayo del 2018, de <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>

- Perdomo-Ortiz, A., Feldman, A., Ozaeta, A., Isakov, S. V., Zhu, Z., O’Gorman, B., ... Biswas, R. (2017). *On the Readiness of Quantum Optimization Machines for Industrial Applications*. Recuperado de <http://arxiv.org/abs/1708.09780>
- Perdomo-Ortiz, A., Fluegemann, J., Narasimhan, S., Biswas, R. y Smelyanskiy, V. N. (2015). A Quantum Annealing Approach for Fault Detection and Diagnosis of Graph-Based Systems. *The European Physical Journal Special Topics*, 224(1), 131-148. DOI: <http://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02347-y>
- Provost, F. y Fawcett, T. (2013). Data Science and its Relationship to Big Data and Data-Driven Decision Making. *Big Data*, 1(1), 51-59. DOI: <http://doi.org/10.1089/big.2013.1508>
- Real Academia Española (RAE) (2014). *Diccionario de la lengua española* (23.ª ed.). Recuperado el 22 de mayo del 2018, de <http://dle.rae.es/?id=A4gCmLp>
- Robles, J. M. (Coord). (2017). Las desigualdades digitales. Los límites de la sociedad red. *Panorama Social*, (25).
- Roquet, N., Soleimany, A. P., Ferris, A. C., Aaronson, S. y Lu, T. K. (2016). Synthetic Recombinase-Based State Machines in Living Cells. *Science*, 353(6297), aad8559. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.aad8559>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. y Harnisch, M. (2015). Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing. *Boston Consulting*, (1-5). DOI: <http://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Sanders, M. (2009). STEM, STEM education, STEMmania. *The Technology Teacher*, 68(4), 20-26.
- Satoshi Nakamoto. (2008). Bitcoin. *Www.Bitcoin.Org*, 9. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10838-008-9062-0>
- Schaller, R. R. (1997). Moore’s Law: Past, Present and Future. *Spectrum IEEE*, 34(6), 52-59. DOI: <http://doi.org/10.1109/6.591665>
- Shannon, C. E. (1947). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423. DOI: <http://doi.org/10.1145/584091.584093>
- Shor, P. W. (1994). Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring. En *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (pp. 124-134). DOI: <http://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>
- Tucker, A. B. (2004). *Computer Science Handbook* (2.ª ed.). Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- Turing, A. M. (1937). On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem*. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42(1), 230-265. DOI: <http://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>

- Wiesner, S. (1983). Conjugate Coding. *ACM SIGACT News*, 15(1), 78-88. DOI: <http://doi.org/10.1145/1008908.1008920>
- Wing, J. M. (2006). Computational Thinking. *Communications of the ACM*, 49(3), 33. DOI: <http://doi.org/10.1145/1118178.1118215>
- Xia, F., Yang, L. T., Wang, L. y Vinel, A. (2012). Internet of Things. *International Journal of Communication Systems*, 25(9), 1101-1102. DOI: <http://doi.org/10.1002/dac.2417>
- Zdeborová, L. (2017). Machine Learning: New Tool in the Box. *Nature Physics*, 13(5). DOI: <http://doi.org/10.1038/nphys4053>
- Zyskind, G., Nathan, O. y Pentland, A. S. (2015). Decentralizing Privacy: Using Blockchain to Protect Personal Data. En *Proceedings - 2015 IEEE Security and Privacy Workshops, SPW 2015* (pp. 180-184). DOI: <http://doi.org/10.1109/SPW.2015.27>

Impacto de la impresión 3D en los mecanismos principales de la globalización

Geraldine Andrea Cuéllar-Alturo, Roberto Javier Rueda-Esteban,
Jaime Enrique Cascante-Vega y Mariajosé Serna-Ayala

Resumen

La impresión 3D es una tecnología que permite la creación de objetos tridimensionales a partir de diferentes materiales. En los últimos treinta años han surgido distintas modalidades que han permitido que dicha tecnología permee diferentes áreas. El objetivo del presente capítulo es analizar el impacto de la impresión 3D en el marco de la globalización, teniendo en cuenta dos grandes áreas: i) las cadenas de producción en cuanto al cambio de las dinámicas y ii) la comunicación relacionada con la posibilidad de tener objetos idénticos en lugares remotos. Teniendo en cuenta diferentes aspectos, la impresión 3D puede incentivar la comunicación global; sin embargo, puede irrumpir en las dinámicas económicas actuales en aspectos como el transporte y el almacenamiento.

Palabras clave: deposición fundida, estereolitografía, extrusión, globalización, impresión 3D

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Rueda-Esteban, R. J., Cascante-Vega, J. E., Cuéllar-Alturo, G. A. y Serna-Ayala, M. (2019). Impacto de la impresión 3D en los mecanismos principales de la globalización. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 151-169). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.6>

Impact of 3D printing on the main mechanisms of globalization

Geraldine Andrea Cuéllar-Alturo, Roberto Javier Rueda-Esteban,
Jaime Enrique Cascante-Vega y Mariajosé Serna-Ayala

Abstract

3D printing is a technology that allows the creation of three-dimensional objects from different materials. In the last thirty years different modalities have emerged that have allowed this technology to permeate different areas. The objective of this chapter is to analyze the impact of 3D printing within the framework of globalization, considering two major areas: i) production chains in terms of changing dynamics and ii) communication related to the possibility of have identical objects in remote places. Considering different aspects, 3D printing can encourage global communication. However, it can break into current economic dynamics in areas such as transport and storage.

Keywords: molten deposition, stereolithography, extrusion, globalization, 3D printing

Introducción

La globalización, según Schirato y Webb (2003) en su libro *Understanding Globalization*, es el nombre que se utiliza para designar las relaciones de poder, las prácticas y las tecnologías que caracterizan y apoyan la construcción del mundo contemporáneo. Sin embargo, más que una noción abstracta de identidad mundial, la entenderemos como una nueva era en la cual los pueblos alrededor del planeta están cada vez más sujetos a las dinámicas del mercado global (Martell, 2007, citado en Pastrana y Pacheco, 2010, p. 579).

El desarrollo tecnológico es considerado uno de los principales facilitadores del proceso de globalización (Narula, 2014); el desarrollo tecnológico en cuanto a maquinaria —facilitando el transporte de productos y materia prima— y en cuanto a las tecnologías informáticas —posibilitando el intercambio inmediato de información, ideas y expresiones culturales— son los dos aspectos que se tendrán en cuenta para evaluar en qué medida la impresión 3D puede ser disruptiva para este proceso de globalización.

A fin de evaluar la impresión 3D en el mencionado marco contextual, es necesario identificar su influencia como tecnología en los procesos que hoy en día hacen posible la globalización, para después evaluar si por el hecho de ser una tecnología nacida en un mundo globalizado, se convierte instantáneamente en una que contribuya a dicho proceso. Iniciaremos con un contexto histórico, en el que el nacimiento de la impresora 3D precede al nacimiento del concepto de globalización, para finalizar evaluando cómo la impresión 3D puede favorecer o interrumpir las dinámicas de comunicación, ideología y abstracción del mundo real, inherentes al mundo globalizado.

Comenzaremos exponiendo las diferentes tecnologías de impresión 3D que existen en la actualidad, con sus respectivos alcances y aplicaciones en las industrias, con el objetivo de evaluar su impacto en el proceso de globalización actual. Este impacto, como ya se ha mencionado, se enmarcará en las dinámicas económicas actuales, consideradas como consecuencias del proceso de globalización. Todo esto a fin de determinar en qué medida la impresión 3D resulta disruptiva en cómo concebimos el mundo globalizado.

¿Qué es la impresión 3D?

Con la invención de los distintos medios digitales, se dio la aparición de una subsección del mundo denominada *lo virtual*. Esta se forma a partir de diferentes ambientes que pueden ser alterados por varias personas al mismo tiempo y por medio de recursos digitales.

Al inicio, existía una brecha enorme entre *lo virtual* y *lo real*, que se ha hecho cada vez más estrecha con la aparición de nuevas tecnologías. El interés por unir o enlazar estas dos secciones de nuestra realidad actual se basa en utilizar la facilidad de edición para la producción de piezas reales y generar el impacto tangible que tienen las cosas *reales* con las *digitales*.

En los últimos treinta años, han surgido diversas modalidades y técnicas que han permitido la impresión de objetos tridimensionales con distintos materiales, resoluciones (entendidas como la distancia mínima a la cual se pueden disponer dos elementos y que estos se sigan diferenciando) y aplicaciones.

Grosso modo, todo proceso de impresión 3D requiere de tres pasos básicos: se debe disponer de la pieza a imprimir en un archivo digital compatible con el *software* que esté incorporado en la impresora (*firmware*); luego se realiza la producción por medio de impresión, y finalmente se requiere un posprocesamiento. Estos últimos dos pasos difieren dependiendo de la modalidad de impresión y los materiales que se utilicen, expuestos a continuación.

Modalidades de impresión tridimensional

Deposición fundida

Los procesos por deposición fundida trabajan bajo el principio de extrusión de un material que da lugar a su fase líquida por medio de calor para ser depositado siguiendo un patrón, el cual se define dependiendo del diseño de la pieza a imprimir. Las principales ventajas de esta modalidad son evidentes debido a su sencillo principio de funcionamiento, pues permite la creación de versiones de bajo costo con una amplia gama de materiales, pero obteniendo elementos de baja precisión. Esta técnica comprende cuatro tipos:

Modelado por deposición fundida

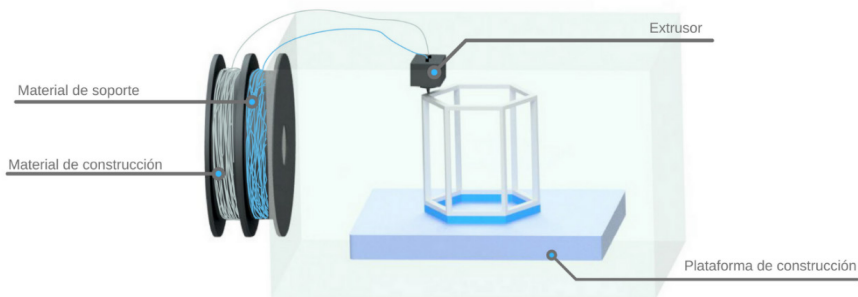
El modelado por deposición fundida (MDF) fue inventado en 1980 por Scott Crump y fue patentado en 1989. A partir de este método, fue fundada Stratasys Ltd., hoy conocida como líder y pionera en el mundo de la impresión 3D. Esta tecnología consiste en la extrusión de termoplásticos en un estado semilíquido y su deposición

sobre una plataforma. Permite crear piezas con una alta resistencia mecánica, pero las superficies pueden ser rugosas dependiendo del radio de la boquilla de deposición (Lipson y Kurman, 2013, p. 69).

Las impresoras que funcionan por MDF están usualmente compuestas por dos carretes de material, una boquilla de extrusión y una plataforma. La presencia de dos carretes se debe a la necesidad de diferenciar el material para la pieza y el material para el soporte sobre el cual se imprimirá la pieza o “andamio”. Dicho soporte, en esta modalidad de impresión, es una estructura delgada y sencilla que se imprime antes de iniciar la producción de la pieza; esto se hace para evitar que la base de la pieza se adhiera a la plataforma y se fracture al momento de retirarla. Para que el soporte sea más sencillo de retirar de la plataforma y posteriormente de la pieza, el material con el que se fabrica debe ser más débil que el material de producción de la pieza en sí.

La boquilla de extrusión se encuentra sujeta a una estructura que cuenta con tres grados de libertad, con el fin de que la deposición del material se pueda dar en las tres dimensiones. Dependiendo de la impresora, el material de la plataforma varía: en las más económicas suele ser de acrílico o materiales similares; sin embargo, en impresoras más sofisticadas la plataforma suele ser de vidrio, lo cual facilita el desprendimiento de la pieza (Dandgaval y Bichkar, 2016).

Figura 1. Técnica de moldeado por deposición fundida, estructura y partes funcionales



Fuente: elaboración propia

La impresora original diseñada por Scott Crump, con la cual se fundó la empresa Stratasys, tenía como objetivo la producción a nivel industrial, por eso durante sus

primeros treinta años estuvieron enfocados en impresoras de gran tamaño y alta resolución que eran bastante costosas. Con el tiempo, se realizaron modificaciones en cuanto a resolución y tamaños permitiendo el desarrollo de impresoras 3D de escritorio. MakerBot Industries (se unió a Stratasys en el 2013) fue la primera empresa en desarrollar una impresora 3D de escritorio y la más económica del mercado en su momento.

Extrusión de engrudo

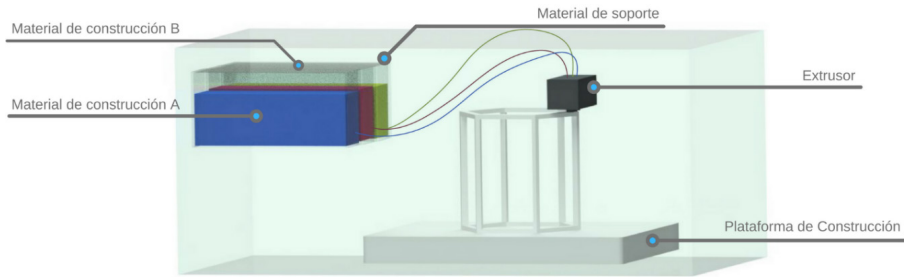
Esta tecnología es bastante similar al MDF. Consiste en un mecanismo que extruye el material por una boquilla siguiendo una ruta específica, capa tras capa hasta completar la pieza. Esta técnica no utiliza termoplásticos. El material de impresión para las impresoras que utilizan esta técnica consiste en un engrudo frío o ligeramente calentado, el cual es posteriormente curado o secado con aire. Al no contar con un mecanismo de calentamiento tan potente como las impresoras por MDF, la creación de piezas se ve limitada al uso de materiales con puntos de fusión más bajos. Por esto, el punto de fusión del material y su fase se vuelven los únicos criterios de importancia para elegir la materia prima con la que se desea imprimir. Debido a esto, la técnica permite experimentar con una gran variedad de materiales en distintas áreas, donde no se requiera gran detalle a pequeña escala (Warnier *et al.*, 2014, p. 14).

Inyección de material

Conocida comercialmente como PolyJet, es la tecnología más reciente entre los procesos por deposición fundida. Fue creada en el 2002 por la empresa Object Geometries (se alió con Stratasys en el 2012). Esta modalidad de impresión consiste en la extrusión de gotas (en dimensiones de micrones) de fotopolímeros, que son polímeros cuya composición se ve alterada por la presencia de luz ultravioleta (UV), para curar cada capa por medio de esta luz. En el proceso también es necesaria la construcción de un soporte para la pieza a producir, el cual usualmente es impreso en un material de textura similar a un gel soluble (Lipson y Kurman, 2013, p. 70).

Esta es una de las técnicas que más avance ha presentado en el mercado y actualmente ofrece la posibilidad de imprimir con diversos materiales y colores, además de que permite la producción de piezas listas para usar (Stratasys, s. f.).

Figura 2. Técnica de inyección de material, estructura y partes funcionales



Fuente: elaboración propia

Formación de red por medio de láser (LENS)

Esta técnica da la liberación de material sobre una línea guía de láser de alta potencia. Las partículas de material que caen exactamente en la línea guía se derriten y se funden a la capa previa del material. Fue desarrollada por el Laboratorio Nacional Sandia, uno de los laboratorios más reconocidos de Estados Unidos, enfocado en el desarrollo de energías de alta potencia (Sandia National Laboratories, s. f.). Al usar material pulverizado y un láser de alta potencia, está dedicada a la producción de piezas metálicas en 3D, despertando interés por esta tecnología en las grandes industrias como la automovilística y aeronáutica.

Procesos de uniones sucesivas

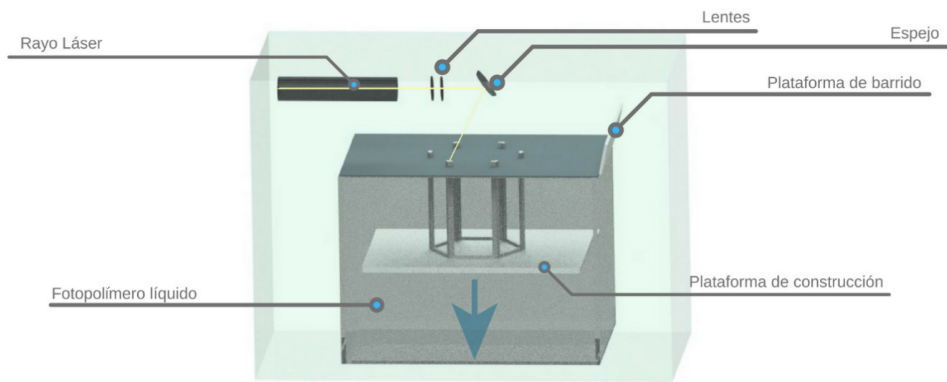
Esta familia de procesos utiliza el principio de unir, fusionar o pegar capas completas de material para recortar los bordes de cada capa. En la mayoría de estos, no se requiere la creación de un soporte, ya que siempre se está construyendo sobre una superficie y comprende tres tipos:

Estereolitografía

El inicio de esta tecnología es atribuido al investigador japonés Hideo Kodama (1981), quien describió el proceso como un método automático para generar modelos 3D en capas por medio de un polímero fotosensible, curado por una luz dirigida a la superficie de la pieza y cortado por una máscara. Sin embargo, fue Chuck Hull quien concibió la estereolitografía como se la conoce hoy en día en 1986; fue patentada en 1991 y a partir de ella nació la empresa de 3D Systems. Consiste en la manufactura de piezas capa por capa.

Inicialmente se tiene —en la parte inferior de la impresora— un depósito que contiene un fotopolímero en forma líquida, la capa superior queda expuesta a un rayo láser uv que solidifica el fotopolímero. A su vez, el rayo dibuja y recorta la forma de la capa después de estar solidificada. Después, la capa ya solidificada desciende una fracción de milímetro dando paso a más polímero fotosensible aún en forma líquida para continuar el proceso. Al terminar todas las capas, usualmente se realiza un posprocesamiento con el fin de tener mejores acabados, con lija o pulidora.

Figura 3. Técnica de estereolitografía, estructura y partes funcionales



Fuente: elaboración propia

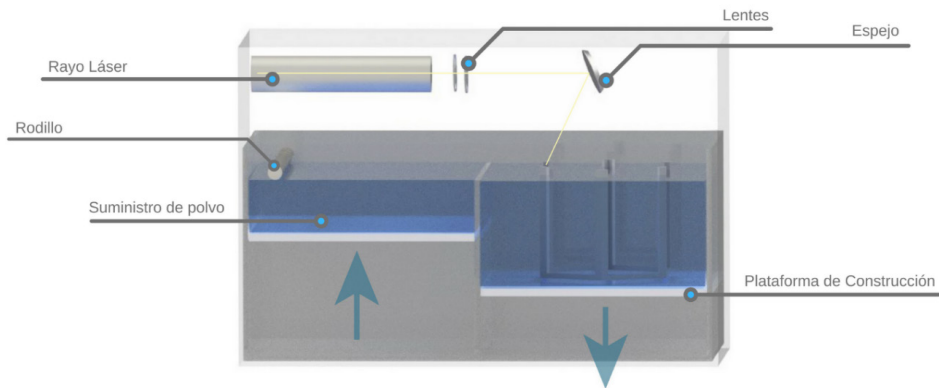
La principal ventaja de este método es su alta resolución dada por el uso del láser, que permite crear piezas micrométricas. No obstante, la manipulación de polímeros fotosensibles ha resultado ser tóxica y estos tampoco cuentan con la dureza y resistencia de los materiales termoplásticos usados en el MDF. Dado el uso del láser en la impresora, es considerablemente costosa, haciendo difícil que esta tecnología se implemente de forma asequible. A pesar de esto, dos egresados del MIT fundaron en el 2013 la empresa Formlabs (Smart, s. f.), cuyo producto estrella es una impresora 3D estereolitográfica de un tamaño de 33 x 33 x 52 cm y un costo de tres mil dólares, aproximadamente el 5 % del costo de las impresoras estándar por medio de estereolitografía en su momento.

Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Esta técnica fue inventada a mediados de 1980 por Carl Deckard y Joe Beaman en la Universidad de Texas (Deckard, 1989). En 1988, fundaron DMT Corp., dedicada a la comercialización de impresoras que utilizan esta técnica (en el 2001, 3D Systems compró la compañía). El SLS consiste en la disposición de capas de material

pulverizado por medio de un rodillo. Luego, un láser de alta potencia derrite el material en la forma de la pieza deseada y finalmente la plataforma baja y da paso a otra capa de material pulverizado.

Figura 4. Técnica de sinterizado selectivo por láser, estructura y partes funcionales



Fuente: elaboración propia

Esta técnica permite trabajar con cualquier material que se pueda encontrar en forma pulverizada y se pueda derretir por medio del láser. Con el SLS, se ha explorado el uso de materiales como nylon, metales, cerámicas y vidrio.

3DP

Su nombre corresponde a: *three dimensional printing* (impresión tridimensional), aunque su principio de funcionamiento se acerca más al de la impresión tradicional bidimensional. Esta técnica fue inventada en 1993 en el MIT y posteriormente comercializada en 1995 por Z Corporation. Al igual que el SLS, esta técnica trabaja con material pulverizado, pero se diferencia en el medio utilizado para unificar las partículas. En 3DP, no se hace uso de un láser; en cambio, se tiene una boquilla que libera un pegamento con el cual se adhieren las partículas pulverizadas. Esto representa una ventaja inicial: la facilidad para añadir distintos colores a la pieza por medio de la misma boquilla de pegamento, por lo cual es una técnica ideal para prototipos de color.

Una de las desventajas es que dado que las partículas están unidas con pegamento y no fundidas, como en las técnicas mencionadas antes, las piezas producidas por 3DP no tienen ningún perfil estructural ni de resistencia y se recomiendan exclusivamente para prototipos (MIT, 1993).

Aplicaciones actuales

Al principio, todos los procesos industriales en los que se usó la impresión 3D estuvieron relacionados con la creación de prototipos y la verificación de decisiones de diseño. Actualmente, la impresión 3D ha podido permear diversos campos, cambiando la forma como concebimos la producción en diversas áreas, debido a las múltiples modalidades que se han desarrollado y a los diversos materiales que cada una de ellas utiliza. A continuación, se presentan casos de estudio en cada una de las áreas donde hoy está presente el uso de la producción por medio de impresoras 3D.

Medicina

Como se mencionó en la sección de extrusión de engrudo, esta técnica inspiró el uso de materiales mucho más diversos que los convencionales y permitió la experimentación con materiales orgánicos, a fin de imprimir algún día un tejido funcional o un órgano completo. Ha tenido tres grandes usos en esta ciencia:

Medicina regenerativa

Los hidrogeles se utilizan como “tintas”, los cuales embeben células u otro tipo de moléculas que ayuden a construir matrices extracelulares o andamios con formas específicas para que estas sean después recubiertas por células y se puedan implantar, en un intento por emular un órgano funcional. Lo llamativo de esta técnica es la posibilidad de controlar la distribución de las células de tal forma que se parezca a la del cuerpo humano.

Ortopedia

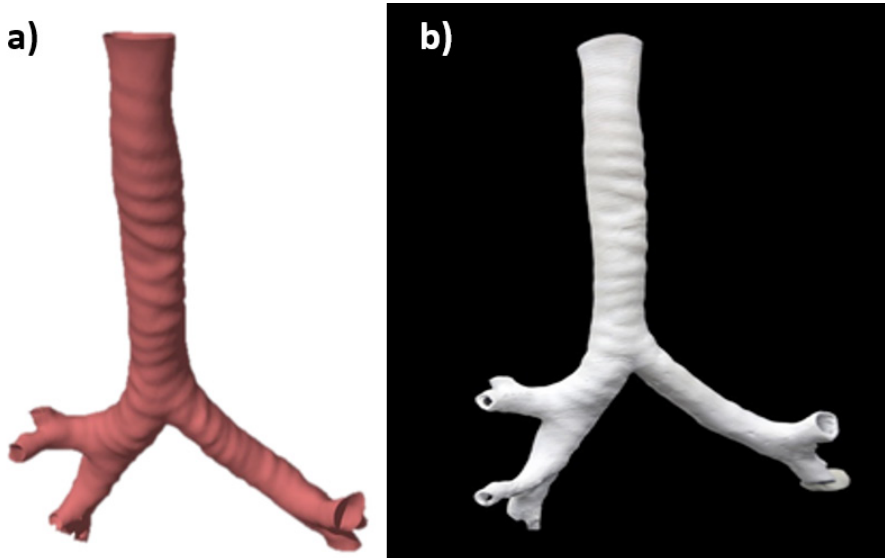
La impresión 3D, y tecnologías afines como escáneres, y otras formas de adquisición de imágenes tridimensionales (*kinect*) han facilitado la personalización de prótesis, órtesis, yesos y otros implementos deportivos como férulas y cascos. Gracias a esto, el tratamiento puede ser personalizado por un costo moderado y sin un tiempo de espera excesivo, ya que este proceso se puede dar a nivel local.

Educación médica

También a partir de todos los métodos actuales de adquisición de imágenes médicas se ha podido conocer mejor el estado y la ubicación de las distintas estructuras en nuestro cuerpo; información sumamente valiosa para los médicos al momento de realizar alguna intervención o estudiar alguna enfermedad. Con ayuda de imágenes médicas y programas de reproducción 3D, se puede realizar la impresión

de distintas estructuras de pacientes con el fin de proveer un conocimiento más amplio del tema.

Figura 5. Exploración de nuevas técnicas de educación en anatomía:
(a) modelo STL de tráquea; (b) el respectivo modelo impreso en 3D



Fuente: basado en Coronel, Palacio y Rueda-Esteban (2017)

Usos industriales

Los usos de la impresión 3D en sus inicios no interesaron a las grandes compañías industriales, las cuales centran sus procesos de fabricación en materiales metálicos. Con la aparición y popularización de tecnologías como el SLS y LENS, la impresión 3D fue tomada en cuenta por estas grandes industrias, ya que permiten una variedad de materiales para imprimir, entre ellos: acero inoxidable, titanio, bronce, plata, oro, platino, hierro y cobre (Locker, 2017).

En la industria, se ha experimentado ampliamente con la impresión en 3D, desde la impresión de versiones miniatura de motores, hasta la creación de partes funcionales y de tamaño real. Esta exploración no ha sido exhaustiva debido a la dificultad que presenta la impresión 3D para la producción en masa, por lo cual los métodos convencionales de manufactura de estas piezas siguen siendo los más favorables.

Armas

La existencia de una tecnología que hoy en día se ha vuelto tan asequible y que tiene toda una cultura basada en el intercambio de archivos se presta para que sea utilizada con otros fines. Este es el caso de las armas impresas en 3D. Cody Wilson, politólogo estadounidense, fue el creador de los primeros diseños de pistolas para ser impresas en 3D en el 2013. El objetivo de Wilson era que los estadounidenses tuvieran acceso a imprimir sus propias armas.

Las armas diseñadas por Wilson están pensadas para imprimirse en las más económicas de las impresoras 3D (MDF de escritorio) y con los materiales más asequibles (ABS y PLA). Los archivos de estas armas estuvieron disponibles durante poco tiempo en Thingiverse, una de las plataformas más populares para compartir archivos de impresión 3D. Sin embargo, sus dueños (MakerBot Industries) decidieron eliminarlos, ya que representaban un riesgo para el nombre de la compañía.

Joyería y moda

La industria de la moda se ha visto favorecida por algunas modalidades de impresión 3D en materiales como nylon, ya que permite la creación de artefactos que no son completamente rígidos y que, por ende, pueden adoptar la forma del cuerpo humano. La joyería ha aprovechado múltiples materiales y la diversidad de formas que se pueden obtener por medio de la impresión 3D. Algunos ejemplos son la manilla en forma de Rizoma de las diseñadoras Jessica Rosenkrantz y Jesse Louis-Rosenberg, la Colección Lost Luggage de Jane Kytanen (técnica SLs, material: nylon) y las manillas en degradé de Maiko Gubler (técnica 3DP, material: yeso).

Arquitectura

Por medio de la tecnología de extrusión de engrudo, se empezó a experimentar con materiales de propiedades físicas semejantes, de alto uso en el día a día. Este fue el caso del cemento, material base para construir la estructura de edificios. La extrusión de engrudo ha llevado a la creación de casas de pequeño tamaño en tan solo veinticuatro horas; actualmente son comercializadas por Apis Cor. A su vez, la construcción de estas casas impresas en 3D cuesta cerca de 40% menos que la construcción por métodos convencionales.

Gastronomía

El mismo principio de extrusión de engrudo también se aplica en el ámbito de los alimentos. Este ha permitido que restaurantes, reposterías y cafeterías ofrezcan productos personalizados o con mayor detalle para una experiencia mucho más exclusiva a sus usuarios.

Impacto en las dinámicas económicas actuales

Las dinámicas económicas actuales son producto del proceso de globalización que se ha documentado a partir de 1989, desde la caída del muro de Berlín y el final de la Guerra Fría. Esto permitió que se pasara de un modelo de producción local a un modelo en el cual los procesos productivos se fragmentaron de forma geográfica, entendiendo los procesos productivos como el conjunto de procedimientos necesarios para la producción de un bien o un servicio. Sean sencillos o sofisticados, dicha fragmentación geográfica tiene la particularidad de tener países desarrollados como sedes de procesos de coordinación y proveedores, ubicados generalmente en países en vías de desarrollo (Bianchi y Szpak, 2013, pp. 7-8). Lo anterior se ve favorecido debido a que la disponibilidad de materia prima, el costo de la mano de obra y la orientación que se le da a la educación profesional según el país favorecen algunos de estos procesos.

Este paso de un modelo de producción local a un modelo de producción fragmentado ha sido impulsado por una serie de avances tecnológicos y científicos que han permitido disminuir el costo del transporte y de la comunicación entre países (United Nations, 2000), razón por la cual se ha considerado al desarrollo tecnológico como uno de los pilares principales del proceso de globalización. Sin embargo, ¿todas las tecnologías son favorables para la globalización?, ¿qué pasa con tecnologías como la impresión 3D?

El nacimiento de una de las tecnologías más famosas de impresión 3D (esterilografía) se dio en el ámbito académico, en el Instituto Municipal de Investigación Industrial en Nagoya, por Hideo Kodama (1981), como se mencionó en la primera sección. Sin embargo, la impresión 3D no pudo ser comercializada sino hasta 1992, momento en que empieza a ser de interés para las áreas médicas (Xu *et al.*, 2004). En el 2005, pasó a ser accesible para el público en general y en el 2008 tuvo una acogida masiva tras la creación de impresoras 3D de escritorio por Maker-Bot Industries, con un costo de doscientos dólares, y permitían el uso de materiales asequibles (PLA o ABS). A diferencia del estándar de la época, el cual era impresoras de aproximadamente cien mil dólares y de gran tamaño. Esto popularizó el uso de la impresión 3D a tal punto que ha permeado en distintos sectores económicos.

El desarrollo y el avance en esta tecnología ayudarían a ahorrar costos en términos de transporte, dado que, si se necesita una pieza de repuesto o un objeto cualquiera, no será necesario ordenarlo o desplazarse para su compra, sino solo tener su archivo digital. La consecuencia inmediata de esta dinámica será volver a un modelo de producción local, brindando una herramienta sencilla y de fácil acceso.

Esto al comienzo representa una ventaja para empresas emergentes o microempresas de todos los países cuyo capital no es suficiente para fragmentar

geográficamente sus procesos de producción. No obstante, a fin de que la impresión 3D también represente una ventaja para empresas grandes, multinacionales, cuya manufactura se basa en la producción en masa, se requiere de mejoras en cuanto a: la capacidad de imprimir en múltiples materiales a costos asequibles, la velocidad a la que se imprime sin disminuir la calidad del producto, y avances en términos de legislación en lo que concierne a propiedad intelectual (DHL Trend Research, 2016, pp. 7-9).

Sin embargo, teniendo en cuenta que es una tecnología en constante desarrollo, y con un aumento de demanda continuo, sería posible afirmar que todas las circunstancias que en la actualidad limitan la completa inclusión de la impresión 3D podrían superarse a corto plazo. De hecho, según McKinsey & Company (2017), se estipula que el tamaño del mercado de la impresión 3D para la industria de metales será de diez billones de dólares para los años 2030-2035.

Hoy en día, hay diversas multinacionales intentando implementar la impresión 3D en sus procesos de producción. Entre ellas se encuentra la compañía de industrial digital General Electric, que logró imprimir aproximadamente la mitad de un viejo motor de helicóptero por medio de impresión 3D aditiva, reduciendo novecientos componentes a solo dieciséis, incluyendo un segmento que antes se componía de trescientas partes diferentes; así, la inclusión de esta tecnología no solo redujo el número de piezas, también significó un ahorro del 60%, y dados los materiales utilizados, las piezas resultantes fueron un 40% más livianas. But Ehteshami, uno de los ingenieros de la división de aviación de General Electric, manifestó que esta tecnología podría eliminar lo que él y su equipo habían hecho durante años (Kellner, 2017).

Sin embargo, los atributos actuales de la impresión 3D hacen que haya ámbitos en los que podría resultar favorable para cualquier tipo de negocio. En la etapa de prototipado, paso indispensable al momento de lanzar un nuevo producto o para la producción de nuevos componentes, las impresoras 3D representan una gran ventaja en la industria. Esto se debe a que permiten la materialización de ideas de forma rápida y versátil, bajo la supervisión del equipo administrativo y de diseño de una compañía (Pew, 2016).

The Ford Motor Company (2017) se encuentra explorando la impresión 3D para la producción de piezas a gran escala como el alerón de un carro, debido a posibles beneficios como costo-efectividad y personalización. Además, resaltan la ventaja del rápido prototipado que ha representado para la empresa en el área de desarrollo de nuevas líneas.

Así mismo, distintas industrias no solo tienen que encargarse del diseño de nuevos ejemplares, también deben tener la capacidad de ofrecer a sus clientes los

repuestos correspondientes a cada modelo que diseñan. Sin embargo, es incierto saber cuánto tiempo durará cada modelo en el mercado, ¿diez, quince años?, y por ende es incierto saber hasta qué punto es productivo para una empresa producir repuestos de ciertos diseños. La impresión 3D ayuda a superar este inconveniente, ya que su producción está sujeta a la demanda. Esto significa que en vez de seguir con la producción masiva de repuestos para todos los modelos producidos en los últimos veinte años por una empresa, se pueden tener los archivos 3D de todas estas para que al momento en que alguien los necesite se puedan imprimir con facilidad, sin generar el costo adicional de la producción en masa de una pieza específica y reduciendo los costos de almacenamiento (DHL Trend Research, 2016).

Por otra parte, la impresión 3D da vía libre a la impresión de diversas formas, y ahora impresoras como la PolyJet también permite la impresión de una sola pieza en diversos materiales, lo cual significa que una sola máquina tiene la capacidad de producir diversos productos. Industrias de plásticos, dependiendo de la forma que deseen que tome el objeto y sus respectivos acabados, requieren maquinaria especializada en cada técnica necesaria —rotomoldeado, inyección, entre otros— (Cornish, 1997), por ende, con el uso de impresoras 3D todas estas máquinas pasarían a ser una sola, reduciendo los costos en equipos y en espacio.

Por medio de todas estas ventajas que ofrece, y de todas sus posibles ventajas a futuro, la impresión 3D impulsa a las empresas a volver a una producción local, irrumpiendo así con los procesos económicos actuales dados por el proceso de globalización. Sin embargo, como se mencionó al inicio, el desarrollo en cuanto a tecnologías digitales que facilitan la comunicación virtual también es un proceso que ha promovido la globalización, ya que permite el contacto entre distintas industrias, facilitando la transmisión de ideas y conocimiento.

La impresión 3D está ligada con la creación digital de objetos tridimensionales, los cuales se pueden compartir igual que cualquier otro archivo. La mayor cualidad de estos archivos es que, a diferencia de otras herramientas como planos, dibujos y descripciones que se utilizan para caracterizar y describir un producto, estos transmiten con mayor fidelidad la intención original del autor, evitando malentendidos y permitiendo que todos aquellos que tengan una impresora 3D a su disposición puedan obtener el mismo objeto.

A su vez, para complementar esta gran gama de posibilidades en cuanto a impresoras 3D que aumentan su accesibilidad, hay dos sucesos que han incrementado el alcance de la impresión 3D: la divulgación y creación de archivos tridimensionales, a partir de plataformas en línea especializadas que permiten la carga y descarga gratuita de archivos 3D a cualquier persona en el mundo. El ejemplo más famoso es Thingiverse, en donde se encuentran diseños 3D de todo tipo de objetos, desde joyería y decoración para el hogar, hasta los más complicados diseños

de robots para automatización. Así mismo, todos los diseños son abiertos al uso (*open source*), lo que directamente favorece el proceso de comunicación en forma de replicación de estructuras 3D.

La creación de estos archivos 3D, previo al 2002, estaba enmarcada únicamente en *softwares* privados establecidos por grandes empresas como AutoCAD y Rhino, entre otras, por lo cual se segregaba a un grupo de personas que no podían costear estos programas. En el 2002, FreeCad surge como la primera plataforma gratuita para modelado paramétrico 3D y diseño de objetos 3D. El modelado paramétrico hace referencia a la posibilidad de modificar diseños 3D revisando su historial de modificaciones y por lo tanto los diseños que los individuos cargan no están sujetos a ser etéreos, es decir, su naturaleza de cambio permite que cualquier otra persona acceda a ellos y los modifique para fines específicos.

Se hace evidente que esta tecnología permite que regiones aisladas del mundo globalizado tengan acceso a los mismos productos, con igual calidad, precio y consistencia, que una persona en cualquier país del primer mundo. Todo esto se ha visto favorecido por la evolución de la impresión 3D como proceso, del aumento en sus resoluciones, en la disminución de sus costos y en la cultura que la rodea (*softwares* gratis y plataformas de divulgación), haciendo posible que estas sean adquiridas por múltiples personas en diversas partes del mundo.

Conclusión

Todo lo anterior sugiere dos resultados evidentes. Es innegable que la entrada de la impresión 3D en múltiples industrias de producción va a generar una ruptura en la organización económica actual que caracteriza al mundo globalizado como le entendemos actualmente. Sin embargo, la cultura que ha surgido alrededor de la impresión 3D se ha orientado a facilitar y a expandir la disponibilidad de archivos, y finalmente objetos, en todo el mundo. Cabe aclarar que esta nueva modalidad de comunicación requerirá que servicios profesionales como el diseño de productos, la ingeniería y la regulación en cuanto a propiedad intelectual sean tratados de manera global, sin importar que la producción de bienes sea local y se deje de lado la organización económica actual.

Referencias

- Atherton, K. (2015). Is 3D-Printing A Gun Free Speech? *Popular Science*. Recuperado de <https://www.popsci.com/is-printing-gun-free-speech%3F>
- Berg, B., Hof, S. y Kosta, E. (2016). *3D Printing, Legal, Philosophical and Economic Dimensions*. Nueva York: Springer.

- Bianchi, E. y Szpak, C. (2013). *Cadenas globales de producción: implicancias para el comercio internacional y su gobernanza*. Recuperado de http://flacso.org.ar/wp-content/uploads/2014/10/Cadenas-globales-de-produccion-C3%B3n-FLA_OMC_18_Cadenas.pdf
- Briggs, A. y Burke, P. (2002). *De Gutenberg a internet: una historia social de los medios de comunicación*. Buenos Aires: Taurus.
- Cornish Álvarez, M. L. (1997). *El ABC de los plásticos*. Bogotá: Universidad Iberoamericana.
- Coronel, J., Palacio, J. y Rueda-Esteban, R. (2017). Multiple Software Based 3D Modeling Protocol for Printing Anatomical Structures. *International Journal of Morphology*, 35(2), 425-429. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/s0717>
- Dandgaval, O. y Bichkar, P. (2016). Rapid Prototyping Technology — Study of Fused Deposition Modeling Technique. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 4(4).
- Deckard, C. (1989). *Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering*. Austin: University of Texas.
- DHL Trend Research (2016). *3D Printing and the Future of Supply Chains*. Recuperado de http://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/dhl_trendreport_3dprinting.pdf
- Eisenstein, E. (1980). *The Printing Press as an Agent of Change*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107049963>
- FormLabs. (2018). *3D Printing with Desktop Stereolithography*. Recuperado de <https://www.dynamism.com/download/2016/Intro%20SLA%20white%20paper.pdf>
- Grieser, F. (2015). *FDM VS SLA: 3D Printing Explained and Compared*. Recuperado de <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>
- Hull, C. W. (1991). *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography*. US Patent 4575330A, Estados Unidos.
- Kellner, T. (2017). *An Epiphany of Disruption: GE Additive Chief Explains How 3D Printing Will Upend Manufacturing*. Recuperado de <https://www.ge.com/reports/epiphany-disruption-ge-additive-chief-explains-3d-printing-will-upend-manufacturing/>
- Kodama, H. (1981). Automatic Method for Fabricating a Three-Dimensional Plastic Model with Photo-Hardening Polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), 1770-1773. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1136492>
- Lipson, H. y Kurman, M. (2013). *Fabricated*. Hoboken: John Wiley.

- Locker, A. (2017). *Metal 3D Printer Guide 2018 — All About Metal 3D Printing*. Recuperado de <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>
- Lonjon, C. (2017). *Discover the History of 3D Printer*. Sculpteo 3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources. Recuperado de <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- MakerBot (2018). *Connected 3D Printing Solutions*. Recuperado de <https://www.makerbot.com>
- Martínez Ávila, H., Schwarz, S., Rotter, N. y Gatenholm, P. (2016). 3D Bioprinting of Human Chondrocyte-Laden Nanocellulose Hydrogels for Patient-Specific Auricular Cartilage Regeneration. *Bioprinting*, (1-2), 22-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bprint.2016.08.003>
- Massachusetts Institute of Technology (MIT) (1993). *Three-Dimensional Printing Techniques*. Massachusetts: MIT Press
- McKinsey & Company (2017). *How 3-D Printing Will Transform the Metals Industry*. Recuperado de <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-3d-printing-will-transform-the-metals-industry>.
- Narula, R. (2014). *Globalization and Technology*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Nieto Olarte, M. (2013). *Las máquinas del imperio y el reino de Dios: reflexiones sobre ciencia, tecnología y religión en el mundo atlántico del siglo XVI*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Pastrana, E. y Pacheco, Y. (2010). Convención Ramsar a lo largo del eje localglobal; protección de humedales en el Valle del Cauca. *Revista Papel Político*, 15(2). Recuperado de <http://revistas.javeriana.edu.co/sitio/papelpolitico/admin/upload/uploads/7.%20Eduardo%20Pastrana,%20Yilly%20Vanesa%20Pacheco.pdf>
- Pew, S. (2016). *Manufacturing the Future: The Next Era of Globalization with 3D Printing*. Stratasys. Recuperado de <https://www.javelin-tech.com/blog/2016/08/globalization-with-3d-printing/>
- Sandia National Laboratories (s. f.). *Laser Engineered Net Shaping*. Recuperado de <https://www.sandia.gov/mst/pdf/LENS.pdf>
- Schirato, T. y Webb, J. (2003). Chapter 1. The Idea of Globalization. En R. K. Schaeffer (Ed.), *Understanding Globalization: The Social Consequences of Political, Economic, and Environmental Change* (pp. 111-138). Thousand Oaks: Sage Publications.
- Smart, T. (s. f.). *Formlabs, a Leader in Desktop 3D Printing*. Tech Gen Mag. Recuperado el 10 de febrero del 2018, de <http://techgenmag.com/2014/11/formlabs-leaders-in-desktop-3d-printing/>

- Stephenson, S. (2013). *Global Value Chains: The New Reality of International Trade*. E15 Initiative. Recuperado de <http://e15initiative.org/publications/global-value-chains-the-new-reality-of-international-trade/>
- Stratasys (s. f.). *PolyJet Multi-Material 3D Printing*. Recuperado de http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Technical%20Application%20Guides_TAG/TAG_PJ_MultiMaterial_EN_1015.pdf?v=635969150902140765
- The Ford Motor Company. (2017). *Ford Tests Large-Scale 3D Printing with Light-Weighting and Personalization in Mind*. Recuperado de <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2017/03/06/ford-tests-large-scale-3d-printing.html>
- ThingUniverse (2018). *Digital Designs for Physical Objects*. Recuperado de <http://thingiverse.com>
- United Nations (2000). *Economic Globalization: Trends, Risks and Risk Prevention*. Genova: United Nations.
- Universidad de los Andes (2018). *Nueva impresora 3D inventada en los Andes recibe patente*. Recuperado de <https://uniandes.edu.co/noticias/ingenieria/patente-por-invento-desarrollado-en-los-andes>
- Vukicevic, M., Mosadegh, B., Min, J. y Little, S. (2017). Cardiac 3D Printing and its Future Directions. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 10(2), 171-184. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.12.001>
- Warnier, C., Verbruggen/Unfold, D., Ehmann, S. y Klanten, R. (2014). *Printing Things: Visions and Essentials for 3D Printing*. Berlín: Die Gestalten Verlag.
- Xu, T., Jin, J., Gregory, C., Hickman, J. J., Boland, T. (2004). Ink-Jet Printing of Viable Cells. *Biomaterials*, 25(1), 93-99.

Avances de la robótica

Mario Fernando De la Rosa-Rosero

Resumen

La robótica es un área de conocimiento muy amplia en la que tienen cabida la aplicación de fundamentos, teorías y conocimientos desarrollados en múltiples disciplinas (ingenierías mecánica, electrónica, de sistemas y computación, física, medicina y diseño industrial, entre otras). El potencial de esta integración permite ofrecer soluciones innovadoras a problemáticas y actividades cotidianas, para personas de todas las edades. Estas soluciones basadas en la robótica ofrecen mejoras a soluciones ya existentes, además de solucionar problemas que aún no habían podido resolverse. Algunos ejemplos innovadores son: i) los vehículos autónomos e inteligentes, que resuelven problemas durante su desplazamiento y reducen la accidentalidad en las vías; ii) las herramientas de apoyo para cirugías, que permiten realizar procedimientos menos invasivos e intervenir zonas específicas en los pacientes; iii) los drones, que pueden obtener información de zonas de difícil acceso; iv) las soluciones de logística robotizadas, que atienden eficientemente pedidos de tiendas de e-commerce; v) los robots sociales, que ayudan a personas mayores en diferentes tareas; vi) los kits robóticos, que facilitan el aprendizaje de los temas *steam* (Science, Technology, Engineering and Mathematics); y vii) las plataformas con tecnologías de asistencia a personas con discapacidad. Este capítulo presenta ejemplos en áreas importantes para las personas (como el transporte, la manufactura, la medicina, las fábricas, la educación y la investigación), que muestran ideas innovadoras hechas realidad gracias a los sistemas robóticos.

Palabras clave: automatización de procesos con robótica, robótica de servicios, robótica industrial, robótica móvil, sistemas robóticos

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

De la Rosa-Rosero, M. F. (2019). Avances de la robótica. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 171-193). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.7>

Advances in Robotics

Mario Fernando De la Rosa-Rosero

Abstract

Robotics is a very broad area of knowledge in which we can apply principles, theories and knowledge developed in multiple disciplines (mechanical engineering, electronics, systems and computers, physics, medicine and industrial design, among others). The potential of this integration allows offering innovative solutions to problems and daily activities, for people of all ages. These solutions based on robotics offer new answers to problems that have not been resolved and improvements to existing solutions. Some innovative examples are: i) autonomous and intelligent vehicles, which solve problems during their displacement and reduce road accidents; ii) support tools for surgeries, which allow to perform less invasive procedures and to intervene specific areas in patients; iii) drones, which can obtain information from difficult access areas; iv) robotic logistics solutions, which efficiently handle orders from e-commerce stores; v) social robots, which help older people in different tasks; vi) robotic kits, which facilitate the learning of steam topics (Science, Technology, Engineering and Mathematics); and, vii) Platforms with assistive technologies for people with disabilities. This chapter presents examples in important areas (such as transportation, manufacturing, medicine, factories, education and research) that show innovative ideas made possible by robotic systems.

Keywords: process automation with robotics, service robotics, industrial robotics, mobile robotics, robotic systems

Introducción

La robótica es un área de conocimiento multidisciplinaria en la que confluyen conocimientos y teorías de las ingenierías electrónica, eléctrica, de computación, mecánica, mecatrónica y biomédica, y de otras disciplinas como la física y el diseño industrial. El avance y la aplicación de estas disciplinas potencian la generación de soluciones disruptivas (más eficientes, efectivas, seguras y ecológicas) a problemas ya conocidos, y la concepción de soluciones innovadoras a nuevos problemas y nuevos retos que enfrentan las sociedades actuales. Los resultados de estas tecnologías integradas son transformaciones significativas y favorables en las formas de trabajo y de vida de las personas.

En el contexto de este capítulo, se van a destacar principalmente dos grandes áreas de estudio: la robótica industrial y la robótica móvil. En la robótica industrial, el interés son los robots tipo brazo articulado que fueron concebidos y son utilizados para apoyar tareas en fábricas e industrias donde se busca mayor productividad, calidad y precisión en los productos. En la robótica móvil, se trabaja sobre todo en dos tipos de modelos: unos cuya movilidad se asemeja a vehículos que usan las personas (carros, buses, sillas de ruedas, helicópteros, aviones y submarinos) y otros que son los modelos bioinspirados (hormigas, animales de carga, aves, peces, reptiles), con sistemas de movilidad más variados. El primer tipo de modelos se usa como medio de transporte con o sin conductor/piloto para ayudar a las personas a realizar tareas variadas (por ejemplo, transporte de pasajeros, transporte de carga, vigilancia, exploración de ambientes peligrosos o inaccesibles para las personas). El segundo tipo de modelos se usa para estudiar modelos complejos de movilidad y comportamiento para aplicarlos a otros casos de estudio reales.

Este capítulo presenta áreas de interés social donde se tienen casos de estudio con desarrollos en robótica móvil e industrial, cuyas soluciones generan cambios significativos y beneficiosos a mediano y a largo plazo en las actividades cotidianas en la vida de las personas y de la sociedad (verbigracia, trabajo, educación, salud, transporte, entretenimiento, productos de consumo, tareas domésticas, etc). Estos casos exitosos muestran las oportunidades que se identifican en situaciones de la vida de personas o de profesionales para proponer soluciones basadas en robótica

con beneficios significativos; también, pueden servir de inspiración para el estudio de otros casos reales donde pueden identificarse oportunidades similares de mejora para beneficio de personas y de la sociedad.

Transporte

El transporte es un área que afecta a todas las sociedades en el mundo actual, dado su impacto en la movilidad de personas y de productos, en la salud de las personas, en la productividad en una ciudad desarrollada, en la accidentalidad causada por los vehículos y en la calidad de vida de las personas en general. A continuación, se presentan algunos casos de estudio significativos en esta área basados en desarrollos en robótica móvil.

Vehículos (comerciales) autónomos

Un primer ejemplo de sistemas robóticos que hoy en día se integran a las actividades humanas diarias son los vehículos autónomos (sin conductor, *Unmanned Autonomous Vehicles*, UAV). Prototipos de vehículos de los fabricantes Tesla y Google ya están en pruebas de funcionamiento en modo autónomo en ciudades y en autopistas, reconociendo y respetando semáforos y señales de tránsito (límite de velocidad, pare (*stop*), dirección de circulación, intersección de calles, etc.), identificando la marcación de carriles y objetos móviles cercanos (otros vehículos y peatones), funcionando principalmente durante el día, bajo diferentes condiciones de tráfico y buenas condiciones climáticas (Waymo, 2017; Tesla, 2017).

Países desarrollados ya están trabajando en una legislación para definir las responsabilidades en el uso de estos vehículos. En los próximos años, se espera ofrecer vehículos comerciales aprobados bajo una legislación especial. Por otro lado, modelos de alta gama de otros fabricantes (Ford, General Motors, Audi, Mercedes, Volkswagen y Renault, entre otros) ya ofrecen funcionalidades como el despliegue de video de la parte posterior del vehículo para asistencia a la maniobra de reversa, el parqueo automático, la detección de objetos móviles cercanos (otros vehículos y peatones) y la asistencia del frenado en caso de emergencia, que son resultado de los desarrollos sobre vehículos autónomos.

Los desarrollos que se están dando en robótica para el éxito de los vehículos autónomos en ciudades y autopistas son en torno a: transporte público robotizado, planeación dinámica de rutas, visión por computador, procesamiento multisensorial, interacción humano-robot, comunicación intervehículos, caravanas de vehículos autónomos, aprendizaje de máquina e inteligencia artificial. Una de las tecnológicas disruptivas que acompañan estos desarrollos es el *Internet of Things* (IoT), el cual permite que componentes electrónicos de diferentes fabricantes puedan co-

municarse entre ellos. Esto dará vía libre a que los vehículos se puedan comunicar en las vías para compartir datos y definir acciones intervehículos o comunicarse con otros sistemas tecnológicos (semaforización, peajes, tráfico).

Vehículos de asistencia a personas en condición de discapacidad

Hoy en día, las personas en condición de discapacidad deben contar con soluciones de transporte apropiadas según su discapacidad. Actualmente, existen sillas de ruedas manuales (convencionales) y eléctricas. Sin embargo, estas sillas presentan limitaciones cuando la persona tiene discapacidad en sus brazos o si el ambiente tiene irregularidades significativas (por ejemplo, para avanzar entre o sobre obstáculos, avanzar en terrenos irregulares, subir/bajar escaleras y avanzar en rampas muy inclinadas).

El funcionamiento de una silla de ruedas también debe garantizarse en ambientes interiores y exteriores. Basados en sistemas robóticos, actualmente se desarrollan sillas con cuatro ruedas eléctricas, cada una de las cuales puede girar independientemente para lograr trayectorias con diferentes curvaturas o incluso girar 360° en su mismo sitio, con una silla ajustable según la inclinación del terreno para mejorar estabilidad de la silla y la comodidad del pasajero. Estas sillas logran subir/bajar escaleras de hasta 17 cm de alto y 28 cm de largo en una inclinación entre 25 y 30°. El pasajero tiene el control de la silla a través de un *joystick* o de una pantalla táctil. Prototipos de estas sillas eléctricas avanzadas se mostraron en la última edición del evento Cybathlon 2016 (Novak, Wolf y Guglielmelli, 2017).

Vehículos aéreos (drones)

En la misma área de transporte, hoy en día se cuenta con drones (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) para realizar tareas aéreas con seguridad y precisión. Los ejércitos de países desarrollados cuentan con modelos militares muy sofisticados, utilizados principalmente en tareas de reconocimiento, vigilancia y ataque. Por ejemplo, países como Estados Unidos, Inglaterra y Francia han usado drones en las intervenciones recientes en Afganistán, Irak y Siria. Hoy en día, la tecnología y las legislaciones ya permiten contar con modelos comerciales para uso civil, pero con restricciones de distancia al punto de telecomando, carga, información sensorial, altitud y autonomía de vuelo.

Algunos proyectos de empresas en los que ya se aprecia una intervención beneficiosa de los drones son: inspección y vigilancia de infraestructuras (tuberías, torres eléctricas, puentes, carreteras, etc.), elaboración de mapas geográficos,

fotografía aérea, elaboración de material visual publicitario (turismo), reconocimiento e inspección de áreas peligrosas o de desastres y entrega de paquetes (mercancías).

Un caso innovador en su aplicación e interés en situaciones de desastres es el desarrollado por el equipo del proyecto Nokia Saving Lives. Su propuesta integra drones, tecnología de comunicación móvil y cámaras de alta resolución e infrarrojas para búsqueda y rescate de personas en riesgo en el caso de inundaciones. Su sistema de procesamiento de video tiene la capacidad de identificar las zonas de inundación y eso le permite controlar el dron de forma autónoma para volar en estas zonas. Así mismo, el procesamiento de la información de las cámaras infrarrojas le ayuda a identificar posibles cuerpos de personas en las inundaciones. La información procesada se transmite en tiempo real al centro de mando de los equipos de emergencia para definir el procedimiento de rescate. Esta iniciativa fue ganadora del concurso internacional United Arab Emirates Drones for Good Award 2017, que se realizó en Dubai en febrero del 2017 y en el que se contó con más de 1000 propuestas de proyectos usando drones (Eder, 2017).

El uso cada vez más común de los drones en diferentes tareas requiere una legislación apropiada para garantizar la seguridad aérea y de las personas.

Vehículos de exploración espacial

Uno de los objetivos del programa de exploración espacial de Marte, a cargo de la NASA (Estados Unidos), es buscar muestras de formas de vida y rastros de agua en ese planeta. Esto ha llevado al desarrollo de vehículos extraterrestres robotizados (*rovers*) que funcionan bajo condiciones diferentes a las de la Tierra. Estos vehículos están diseñados para tener una fuente de energía renovable, moverse por terrenos irregulares de forma programada superando obstáculos, mantener comunicación con un control de mando en la Tierra, usar herramientas y equipos para tomar muestras físicas y realizar análisis *in situ*. Los vehículos Spirit y Opportunity, lanzados respectivamente en junio y julio del 2003, iniciaron sus misiones de exploración en enero del 2004 y mostraron su desempeño y autonomía superando su vida prevista de funcionamiento. El Spirit envió su última comunicación en marzo del 2010 y el Opportunity la envió en abril el 2018. El siguiente vehículo fue el Curiosity, lanzado en noviembre del 2011, iniciando su misión en agosto del 2012 y actualmente en actividad. El próximo vehículo será el Mars 2020 previsto para la misión en el año 2020 (NASA Science, 2018). Estos vehículos muestran las capacidades de los vehículos robóticos en ambientes extremos y marcianos, y son la base para futuros programas de exploración en otros planetas.

Manufactura y cadenas de abastecimiento

La industria manufacturera es una de las que más jalonan la economía de un país, por el valor económico de los productos y servicios producidos y por el empleo generado. Para ser competitivos en un mundo global, se requiere eficiencia y calidad en la producción. La automatización y la robótica industrial y móvil son áreas que soportan el desarrollo de esta industria, debido a que favorecen una producción a gran escala y de calidad mejorando la competitividad. Estas áreas impulsan la generación de nuevos empleos con disminución en los riesgos laborales y de salud de los trabajadores. Así mismo, se fomenta la creación de nuevas industrias y productos que requieren el uso y ensamble de componentes miniatura con una precisión y confiabilidad mayor a la que consiguen los trabajadores y a niveles de microescala y nanoescala que no logran los trabajadores (Christensen *et al.*, 2016).

Hoy en día, también hay una transformación hacia una manufactura “verde” (ecológica) en la que se debe diseñar y trabajar en procesos de manufactura limpios que recurren a materiales reciclables y biodegradables, cumpliendo con normas oficiales para la regulación y el control en las emisiones de CO₂ y otras partículas nocivas para la salud humana. En esta dirección, los robots pueden ser adaptados para el trabajo en múltiples procesos y productos, con reducción en el consumo de energía manteniendo la productividad y haciendo un manejo de reciclaje del material sobrante de todos los procesos de manufactura.

Un caso exitoso y novedoso en esta dirección es el de Amazon Robotics, en la logística de pedidos de sus clientes. El modelo aplicado para atender los pedidos se implementa en bodegas inmensas donde hay una organización rigurosamente planeada de estantes (muebles) con sus productos. Los despachadores (humanos) atienden cada pedido, pidiendo los productos a un sistema informático central. Un equipo de robots Kiva (*Automated Guided Vehicles*, AGV) se encarga de ubicar y transportar los estantes de los productos solicitados hacia los sitios donde se encuentran los despachadores.

En este ambiente, únicamente circulan los robots Kiva para satisfacer las solicitudes de los despachadores y el sistema informático coordina el equipo de robots Kiva para evitar colisiones y mejorar el desempeño general de atención de pedidos. Los despachadores arman los pedidos con los productos solicitados que llegan en los estantes, los etiquetan con la información del cliente y los paquetes resultantes son dirigidos a un sistema de repartición automático para su transporte final. Este modelo funciona en bodegas con hasta mil robots Kiva, veinticuatro horas al día, siete días a la semana. Este sistema reduce los tiempos de entrega a los clientes y aumenta su satisfacción. Como resultado, esta empresa cada año crece en ventas y en clientes (D’Andrea, 2012).

PAN-Robots es un proyecto europeo que apoya la labor logística de transporte de productos en bodegas donde puede haber circulación de objetos dinámicos como robots móviles autónomos (AGV), trabajadores y otros vehículos conducidos por personas (Sabattini *et al.*, 2018). Para evitar colisiones y accidentes entre los objetos dinámicos o con objetos estáticos, se implementó un sistema sensorial mixto compuesto de un sistema sensorial local embarcado en cada vehículo autónomo (AGV) y un sistema sensorial local de infraestructura que se instala en puntos ciegos (verbigracia, intersecciones de corredores) de una bodega.

El sistema sensorial local se compone de una cámara omnidireccional estereoscópica, una cámara estereoscópica adicional y un sistema de sensores láser escáneres. La cámara omnidireccional (instalada en la parte superior del AGV) y los sensores láser generan una reconstrucción 3D aproximada del ambiente cercano al AGV (hasta una distancia de casi diez metros). La reconstrucción 3D obtenida permite detectar, clasificar y hacer seguimiento de los objetos cercanos al AGV y tomar decisiones de su acción de movimiento evitando colisiones y accidentes. La cámara estereoscópica adicional se instala en la parte inferior del AGV (debajo del sistema de transporte de carga) para detectar con precisión la estructura de carga (*palet* de productos) y que el AGV pueda acoplarla a su sistema de transporte. Una vez la carga está acoplada al AGV, este puede transportarla de forma autónoma hacia un destino definido y la puede descargar.

La integración del sistema de múltiples sensores láser y el mapa de la bodega permiten localizar el AGV en la bodega y también detectar objetos de interés. Por su parte, el sistema sensorial local de infraestructura monitorea puntos ciegos (intersecciones) de vías para detectar e identificar objetos dinámicos que no se detectan en el sistema sensorial local de un AGV. Esta nueva información es tenida en cuenta por un sistema central encargado de planear y coordinar las rutas de los múltiples AGV en la bodega, comunicando la información a los AGV involucrados y así evitar colisiones y accidentes. Este proyecto presenta una solución factible a ambientes industriales donde coexisten personas, AGV y otros vehículos.

Los desarrollos que se están dando en robótica industrial y móvil para generar procesos de manufactura más eficientes y menos costosos giran en torno a: robótica cooperativa entre equipos de robots, programación flexible y dinámica de líneas de producción, robots industriales flexibles y de alto desempeño, efectores terminales (“manos”) flexibles y sensibles, plataformas móviles autónomas y de alto desempeño, mecanismos de interacción/cooperación hombre-robot, nanoelectrónica, nanorrobótica y energías renovables. La problemática de la robótica cooperativa y la programación de líneas de producción también se apoya en el IoT, debido a que múltiples tareas y procesos de producción pueden realizarse con más eficiencia

cuando robots, máquinas programables, sensores y otro tipo de dispositivos tienen la capacidad de comunicarse e intercambiar información.

Medicina

En la medicina se cuenta con sistemas robóticos que asisten procedimientos quirúrgicos que son menos intrusivos que los procedimientos tradicionales, interviniendo en zonas bien identificadas, y disminuyendo los tiempos de las cirugías y de recuperación de los pacientes. Estas ventajas aumentan la efectividad de los equipos médicos reduciendo los costos para las instituciones médicas y los pacientes. Un ejemplo exitoso en esta área es el sistema robótico quirúrgico Da Vinci, en funcionamiento en varios hospitales y clínicas a nivel mundial. Este sistema permite introducir, tras incisiones pequeñas en el cuerpo del paciente, una cámara de alta definición e instrumentos miniatura que permiten un alto grado de manipulación por parte del cirujano. El cirujano hace su intervención en un puesto de trabajo próximo al paciente, manipulando los instrumentos médicos y cuenta con la información de estos instrumentos, de la cámara y de los instrumentos de monitoreo del paciente. Este sistema ha sido utilizado con éxito en procedimientos quirúrgicos de corazón, colon, recto, sistema reproductivo y tórax. Bajo condiciones de comunicación de alto desempeño, este sistema también ofrece la posibilidad de que un cirujano haga una intervención a distancia -en modo teleoperación- (Alkhatib *et al.*, 2015).

Por otra parte, cada vez son más comunes los problemas neurovasculares en personas. Los pacientes sobrevivientes pueden tener afectación en su lenguaje, memoria, capacidad de movimiento o comportamiento. En estos casos, las terapias son ajustadas de acuerdo con las necesidades y los progresos en la salud de cada paciente, pero pueden tomar mucho tiempo antes de la recuperación de los pacientes.

Un caso de interés es el de pacientes con enfermedad o daño neuromuscular, que hace que se pierdan las conexiones entre las neuronas y los músculos para realizar movimientos. En estos casos, un robot puede guiar y medir progresivamente los movimientos que debe realizar un paciente para recuperar la conexión cerebral-muscular del movimiento afectado. Por ejemplo, el robot comercial MIT-Manus tiene un módulo cabestrillo instrumentado con sensores que se ubica en el brazo afectado del paciente y que se ajusta a su antebrazo y muñeca. El paciente con su mano agarra un soporte que está conectado a otro módulo del robot. El objetivo consiste en que el robot le propone movimientos (ejercicios) que el paciente debe imitar moviendo su brazo. De acuerdo con las medidas obtenidas por el robot del movimiento realizado por el paciente, el robot ajusta el movimiento del paciente para ayudarlo a lograr un avance.

En este caso, se han evidenciado mejoras en las medidas de los movimientos del hombro y del codo de los pacientes (Krebs *et al.*, 2004). El resultado del apoyo de terapias con plataformas robóticas es el aumento en la eficiencia de las terapias aplicadas, el aumento en la eficiencia de los terapeutas y médicos que asisten a los pacientes, la reducción en los tiempos de tratamiento de los pacientes y la reducción de costos para la seguridad social (Alkhatib *et al.*, 2015).

En el área de logística, se tiene el caso de los robots móviles TUG (Aethon) en el Hospital El Camino (California), donde ayudan a: distribuir medicinas desde la farmacia hacia las unidades de enfermería, distribuir comidas a los pacientes y recoger las bandejas después de las comidas, transportar ropa de cama desde y hacia la lavandería, transportar muestras clínicas al laboratorio y transportar desechos. Los robots se desplazan usando los mismos espacios que las personas que circulan en el hospital (personal médico, administrativo y de servicios, pacientes y visitantes). Adicionalmente, tienen la capacidad de desplazarse entre las diferentes unidades y pisos del hospital usando los ascensores. Esto facilita y mejora el trabajo del personal de apoyo con los pacientes hospitalizados.

En el área de telemedicina, se cuenta con plataformas robóticas de apoyo a la asistencia y seguimiento de pacientes a distancia. Por ejemplo, la plataforma VITA (InTouch Health y iRobot) puede acompañar a un paciente en su hogar en su proceso posoperatorio o de terapias. Esta plataforma es controlada a distancia y reproduce el audio y el video del médico o terapeuta tratante para darle la sensación de presencia al paciente durante la consulta médica. VITA también sirve de asistencia básica médica a personas en sitios remotos (con carencia de servicios médicos) o en sitios de desastres; y sirve como una plataforma colaborativa para hacer teleconferencias entre dos médicos que realizan un diagnóstico en conjunto. Como plataforma de teleconferencia también puede servir como asistente de personas mayores con problemas de movilidad o de salud para comunicarse con sus familiares que estén lejos.

Otra línea de investigación en medicina con contribuciones significativas basadas en robótica está relacionada con las prótesis para personas con amputaciones de extremidades superiores o inferiores. Una prótesis es un dispositivo artificial mecánico-electrónico que se conecta al sistema óseo, muscular o nervioso de un paciente para mejorar/reemplazar una funcionalidad limitada/perdida en su cuerpo.

Un caso exitoso en esta línea corresponde al brazo robótico Luke Arm, oficialmente denominado Sistema Brazo DEKA, creado por Dean Kamen y su equipo de investigación. El brazo está hecho a escala de un brazo humano, con movilidad en la muñeca y en los dedos, lo cual permite realizar tareas de agarre complejas. Este brazo recibe las señales nerviosas de los músculos del paciente próximas a donde

está puesta la prótesis, que recibe estas señales en un computador embarcado que las interpreta para mover la mano y los dedos en una configuración de agarre. El brazo robótico ofrece seis configuraciones básicas de agarre. La mano posee sensores de fuerza que permiten realizar el agarre con la fuerza requerida para objetos delicados o fuertes. El propósito de este proyecto es ofrecer la posibilidad a personas con alguno de sus brazos amputados de recuperar las funcionalidades básicas del brazo y de la mano, conectando en su cuerpo esta prótesis de brazo articulado y así aumentar su autonomía y mejorar su calidad de vida (Guizzo, 2014).

Debido a la diversidad de aplicaciones y oportunidades que se tienen en el área de la medicina, los desarrollos se están dando en varias líneas. Por un lado, usando robots de cirugía se evidencia la importancia de miniaturizar los instrumentos y equipos utilizados. Esto con el fin de lograr cirugías menos invasivas y con mayor maniobrabilidad por parte de los médicos especialistas en su manejo. Además, se requiere ofrecer a los médicos información más precisa de las zonas de intervención en el cuerpo de los pacientes durante las cirugías.

En esta dirección, se trabaja en sistemas de imágenes/visión tiempo real —como resonancia magnética— que les muestren a los especialistas la ubicación de los instrumentos y los órganos y tejidos cercanos o en contacto con estos durante los procedimientos quirúrgicos. Otro aspecto importante es transmitir a los cirujanos la sensación de contacto al manipular los instrumentos y entrar en contacto con los tejidos y órganos del paciente. Por eso, se trabaja en integrar sistemas sensoriales hápticos (de retroalimentación de fuerzas) con los instrumentos quirúrgicos usando técnicas innovadoras en interacción humano-robot.

Robótica de servicio para público general y profesionales

La robótica de servicio busca facilitar la realización de tareas que son comunes a las personas o a los profesionales y que mejoran su calidad de vida o de trabajo en tareas diferentes a la fabricación industrial. Para estas tareas, las personas interactúan en su ambiente con el(los) robot(s).

Servicios para público general

En tareas domésticas, se tiene hoy al robot aspiradora Roomba (iRobot) que realiza una labor de limpieza, robots para cortar el césped (Tango, John Deere) y robots para la limpieza de ventanas. También, comienzan a ser más comunes los robots mascotas (ChiPPies Interactive Robot, Fuzzy Flyers Kiki Interactive Toy, Hasbro Companion Pet Pup), que sirven de entretenimiento para niños y de acompañamiento

para personas que viven solas. Otro tipo de robots de gran interés para el público general son los robots de entretenimiento, como los drones (Mambo y Bebop de Parrot, Mavic y Phantom de DJI) o el robot Cozmo (Anki), que integra inteligencia artificial. Estos tipos de robots buscan hacer sentir mejor a las personas.

Otra área de mucho interés son los robots sociales, que facilitan la realización de tareas a las personas, por ejemplo, recordar las actividades de una agenda, tomar fotos y videos, recibir mensajes y llamadas, reproducir música y videos e identificar situaciones anormales en el hogar. Los modelos Sanbot y Pepper son de tipo humanoide y ya son comerciales (Sanbot, 2017; Pepper, 2017). Pepper es un robot de asistencia a clientes en un banco. Los modelos Jibo y Buddy son robots sociales en un ambiente familiar, los cuales están en la etapa de fabricación para pasar a comercialización.

Uno de los objetivos de mayor interés en estos robots es la asistencia de adultos mayores, ya que muchas de estas personas viven solas y requieren ayudas importantes en su vida diaria: recordarles los momentos de sus comidas, de sus medicamentos y de otras actividades; o facilitarles la supervisión de sus signos vitales, la comunicación con sus familiares o su médico tratante, y la detección de alguna situación anormal. Giraff (Robotdalen) es un robot móvil equipado con una pantalla y un sistema de videoconferencia que permite a personas mayores comunicarse con sus familiares, amigos y médicos. El modelo Tangy es un robot social que facilita a adultos mayores la realización de juegos de Bingo en grupo (Louie *et al.*, 2014).

En esta categoría, también se tienen los vehículos autónomos (UAV) como apoyo a la conducción. Para estos robots de servicio que llegan a los hogares, los desarrollos en robótica se están dando en las áreas de: interacción humano-robot, diseño exterior (apariencia física) y expresión de emociones, inteligencia computacional y aprendizaje de máquina (*machine learning*).

Servicios profesionales

En otros escenarios, se cuenta con robots móviles de vigilancia que realizan labores peligrosas evitando exponer a personal de seguridad calificado. Algunas tareas que hacen estos robots permiten identificar intrusos en áreas privadas o de seguridad (robot Guardian V5, Robotnik) o manipular paquetes peligrosos o sospechosos de ser bombas explosivas (robot ROV Daksh, Dynalog India).

En la agricultura de cultivos, también hay proyectos innovadores utilizando robótica. Debido al incremento proyectado de la población mundial, se requiere aumentar la productividad de alimentos y su calidad, disminuir el uso del agua y de químicos, usar productos que no contaminen ni afecten la naturaleza o la

salud de los trabajadores y aplicar procesos limpios (verdes). Adicionalmente, la producción agrícola se ve afectada por los cambios climáticos y el calentamiento global. Se está trabajando en estos retos con una agricultura de precisión, con granjas diseñadas con ingeniería y tecnificadas usando automatización y robótica en invernaderos y campos.

Para lograr resultados significativos, se apoyan las diferentes etapas de la producción de alimentos: preparación de terrenos, recolección de maleza, sembrado de semillas, riego, aplicación de químicos, recolección de cultivos (por ejemplo, frutas y verduras), navegación y localización en terrenos cultivados (interiores o exteriores). También, hay avances en el uso de robótica cooperativa, un modelo en el que plataformas móviles terrestres (tractores) se comunican con drones para mejorar las tareas de navegación en cultivos extensos. La agricultura es un área donde se requiere una buena interacción hombre-robot para mejorar las tareas realizadas (Alkhatib *et al.*, 2015).

Por otro lado, la minería es una actividad de alta exigencia física para los trabajadores, con un alto potencial de accidentalidad, y en la que se compromete en gran medida su salud. Así mismo, se usan productos y procesos extractivos que generan mucha contaminación en los terrenos explotados. La robótica y la automatización permiten realizar esta actividad reduciendo la exposición y los riesgos de sus trabajadores, así como mejorar los procesos extractivos. Para ello, se recurre a equipos y vehículos programables y supervisados a distancia por especialistas. En el estado actual de avance de la robótica móvil, también se puede realizar minería en ambientes extremos u hostiles no aptos para el ser humano: extracción en el fondo del mar y subterránea, en volcanes, en desiertos o en otros planetas.

Otro caso de estudio de robots de servicios profesionales se da en hoteles, que son ambientes concurridos por el público general. Algunas marcas de hoteles ya cuentan con los robots Relay (Savioke), que hacen entregas a sus huéspedes en sus habitaciones en cualquier momento del día. El personal en la recepción del hotel ubica el pedido del huésped en un compartimiento especial del robot, programa como destino la habitación del huésped y el robot se desplaza de forma autónoma hasta la habitación destino, evitando colisionar con personas y obstáculos en su ruta. El desplazamiento del robot puede implicar usar los ascensores del hotel. Estas entregas pueden ser comidas, bebidas, productos de aseo personal, etc. Este servicio permite a los empleados del hotel tener más tiempo para atender a los clientes. Por su parte, los clientes lo ven como una experiencia novedosa que aumenta su satisfacción en el servicio recibido.

A su vez, podemos ver el tratamiento a un problema que debe enfrentar la sociedad moderna. Debido a los altos niveles de consumo de productos, se requiere la consecución de más materias primas y su transformación en nuevos materiales.

Esto implica la utilización y explotación de nuestros recursos naturales, que son limitados. Como consecuencia, el reciclaje de materiales y productos renovables es muy importante para poder reutilizarlos en diferentes formas y productos. En este proceso, ya hay empresas contribuyendo con propuestas de soluciones utilizando robots industriales. En particular, el robot paralelo Cortex (AMP Robotics) permite la identificación y el agarre de cajas de cartón (material reciclable) de bebidas y comidas de una banda transportadora para separarlas del resto de material. El robot Cortex está integrado con un sistema que identifica diferentes cajas de cartón reciclables usando técnicas de visión por computador e inteligencia artificial.

La empresa AMP Robotics obtuvo el premio The Ecolab Award 2018 como disruptor en la economía digital circular (AMP Robotics, 2017). Una extensión de este problema en el mundo actual, cada vez más tecnológico, es el tratamiento de la basura electrónica (e-waste) como: bombillos, baterías, electrodomésticos, computadores, portátiles y dispositivos móviles. El reciclaje de esta basura electrónica busca reutilizar y reprocesar los componentes eléctricos y electrónicos contenidos en estos productos. Esta basura exige un tratamiento cuidadoso y, en algunos casos, riguroso porque puede generar problemas graves de salud en los trabajadores debido a los químicos que contiene. Plataformas basadas en robótica y automatización son soluciones muy beneficiosas para el reciclaje de basura electrónica evitando la exposición de trabajadores en esta labor. Por ejemplo, WEEE (Electronic and Electric Material Recovery Plant, Coparm) es una planta industrial automatizada para la recuperación de material eléctrico y electrónico (Coparm, 2015).

Los desarrollos que se están dando en robótica de servicios profesionales giran en torno a: integración multisensorial, miniaturización de componentes electrónicos y mecánicos, procesamiento de imágenes y visión, protocolos de comunicación confiables y en tiempo real, capacidad de manipulación de objetos físicos y desarrollo de fuentes de energía renovables y limpias.

Fábricas robotizadas

Durante muchos años, el propósito de la robótica fue automatizar los procesos de fabricación en industrias grandes como la automotriz y la manufactura, dado el gran volumen de unidades demandadas, la necesidad de reducir los tiempos de fabricación y la exigencia en la calidad de los productos. Las condiciones anteriores se lograron con el desarrollo de robots industriales de gran precisión integrados en líneas automatizadas de fabricación y ensamblado de productos. Hoy en día, la automatización de procesos de fabricación es crucial para aumentar la productividad y definir nuevos productos con nuevas exigencias, rediseñando las actividades de los trabajadores.

Un ejemplo de una compañía que aprovecha la tecnología, la automatización y la robotización es la del fabricante Tesla (Fremont, California), cuya producción se estima en 500 000 vehículos anuales a partir del 2018. Esta compañía está diseñada para fabricar la mayoría de las partes utilizadas en sus vehículos, generando empleos para muchos trabajadores y haciendo más eficiente el proceso de fabricación de los vehículos. Para lograr su objetivo de producción bajo un exigente estándar de calidad, y así llegar a ser más competitivos frente a los vehículos de combustibles fósiles (gasolina y derivados), Tesla concibió y está construyendo por fases su propia fábrica de baterías de Litio-ion (Sparks, Nevada), con un alto nivel de automatización y robotización, funcionando con fuentes de energía renovable, mejorando sus procesos de manufactura y desarrollando tecnologías de punta en energía renovable y en baterías eléctricas. Estas tecnologías ya tienen demanda de otros fabricantes por demostrar ser fuentes de energía eficientes y limpias.

Debido a sus desarrollos de última tecnología, Tesla es líder en el mercado de vehículos eléctricos, un nuevo mercado que está atrayendo inversionistas y compradores porque los vehículos usan energía renovable y limpia, reduciendo las emisiones de gases y partículas nocivas para las personas. Así mismo, sus modelos más recientes incluyen el “piloto automático” (bajo supervisión del conductor) que reduce posibles errores humanos de conducción y mejora la calidad de la conducción, el tráfico en las vías y la experiencia de los pasajeros. También, Tesla está abriendo mercados en equipamiento de energías renovables en construcciones habitacionales (casas, edificios, fincas) y de servicios (fábricas, hospitales, colegios, granjas, zonas industriales).

Educación

A nivel de educación, las tecnologías avanzadas aplicadas en robótica apoyan el desarrollo de las áreas STEAM. La robótica ha favorecido avances en medicina (como los logros del sistema Da Vinci), en tecnología (en sistemas de alta precisión como los requeridos en la fabricación de componentes de micro y nanoelectrónica) y en ingeniería (como el sistema Kiva y los vehículos autónomos Waymo y Tesla). Para garantizar un desarrollo económico, científico y tecnológico sostenible, los países más desarrollados incluyen los temas de estudio de STEAM en sus sistemas de educación desde la escuela primaria para incentivar la formación de profesionales en estas áreas, quienes serán los futuros impulsores y creadores de nuevos retos científicos, tecnológicos e industriales. Los robots son un medio llamativo para que niños, niñas y jóvenes aprendan jugando. A partir del uso de kits de robótica educativa, se hacen cursos, tutoriales, talleres y competencias, donde se enseñan conceptos y técnicas propias de la electrónica y la programación. Algunos ejemplos de robots utilizados en el medio educativo son el LEGO Robotics (Danahy *et al.*, 2014; Estrada, 2017) y el Thymio II (Magenat *et al.*, 2014).

En las facultades de Medicina, ya se usan plataformas robóticas tipo maniquís instrumentados que simulan de forma realista a pacientes mostrando actividad del corazón, presión arterial, sonidos del corazón, pulso, ritmo respiratorio, sangrado y que reaccionan a medicamentos. Estas plataformas se usan en la formación y entrenamiento de médicos, enfermeras y equipo paramédico en condiciones simuladas; y son herramientas educativas que permiten apreciar la aplicación de los procedimientos médicos y clínicos por parte de cada profesional y las capacidades de trabajo y comunicación en un equipo médico.

En esta misma dirección, existen ambientes computarizados de simulación y entrenamiento en diferentes disciplinas, que integran tecnologías desarrolladas en robótica, mecanismos y actuadores, visualización realista por computador, sistemas sensoriales y audio. Estos sistemas de simulación buscan recrear computacional y mecánicamente situaciones que puedan darse en la realidad y generar en las personas una sensación de inmersión. Las personas o aprendices pueden interactuar con los objetos en el ambiente visual computarizado, mostrando sus conocimientos y habilidades en situaciones hipotéticas sin afectar vidas humanas. Estos simuladores para entrenamiento se desarrollan desde hace muchos años, porque han demostrado ser herramientas efectivas de educación.

Con el avance de diferentes tecnologías, se tienen simuladores de entrenamiento cada vez más precisos, completos, interactivos y con buen realismo en las situaciones recreadas. Como productos de simulación con buen nivel de desarrollo y realismo, dirigidos a profesionales, hoy en día se tienen simuladores de vuelo de aviones, helicópteros y vehículos más comunes (carros, autobuses y camiones).

En el contexto médico, los simuladores de entrenamiento también tienen mucha importancia. Existen simuladores básicos para procedimientos médicos que buscan desarrollar habilidades en el manejo de instrumentos médicos y en la realización de procedimientos quirúrgicos, que permiten evaluar el desempeño de los médicos aprendices durante una intervención sin el riesgo de afectar vidas humanas. Adicionalmente, estas prácticas simuladas aumentan el nivel de aceptación de los médicos a los sistemas robóticos quirúrgicos que cada día serán más comunes en su ambiente de trabajo.

Investigación motivada por competencias

A nivel de investigación, también se incentiva la solución de problemas complejos basados en plataformas robóticas a partir de competencias. Un evento de reconocimiento internacional es el de RoboCup, organizado anualmente desde 1997 por la RoboCup Federation para promover el desarrollo del estado del arte en la inteligencia de robots. Este evento organiza competencias entre ligas que

proponen diferentes retos inspirados en problemas de la vida real, en las que se incentiva la generación de nuevas y mejores soluciones usando robots y tecnología de actualidad.

La última versión de RoboCup se celebró en Montreal (Canadá) en el 2018, donde participaron alrededor de cuatrocientos equipos de 35 países del mundo compitiendo en quince categorías; cada categoría define sus propios retos con robots autónomos, con diferentes características y habilidades. Actualmente, se tienen: la liga de fútbol robótico (RoboCup Soccer), compuesta de cinco categorías; la liga de rescate (RoboCup Rescue), compuesta de dos categorías; la liga doméstica en casa (RoboCup@Home), compuesta de tres categorías; la liga industrial en el trabajo (RoboCup Industrial), con dos categorías; y la liga infantil (RoboCup Junior), compuesta de tres categorías.

Cada año, los retos de las categorías más desarrolladas se mantienen, pero se actualizan las condiciones o restricciones de funcionamiento para aproximarlos a los retos en condiciones reales, incentivando a los equipos participantes a tratar problemas cada vez más complejos. Por ejemplo, la categoría *MSL* (*middle-size league*) de fútbol robótico existe desde 1997 y actualmente utiliza el campo de fútbol más grande (18 m x 12 m) donde compiten dos equipos, cada equipo con cinco robots móviles autónomos.

Así mismo, RoboCup también promueve la creación de nuevas ligas o categorías donde se identifican nuevos retos de la vida real, en los cuales en el estado actual de la robótica se puede contribuir con soluciones apropiadas y eficientes. Por ejemplo, en la liga RoboCup@Home recientemente se incluyeron las categorías de las plataformas estándar doméstica (DSPL) y estándar social (SSPL), definiendo retos donde se evidencia la necesidad de la interacción hombre-robot en escenarios de coexistencia de personas y robots.

El evento en robótica tipo competencia más exigente en los últimos años ha sido el DARPA Robotics Challenge (DRC) (2015), cuya etapa final se realizó entre el 5 y el 6 de junio del 2015. Este evento presenta un caso de estudio en robótica de rescate, inspirado en el desastre nuclear de Fukushima, en Japón (11 de marzo del 2011), el cual consistió en realizar con un robot un conjunto de ocho tareas que se identifican como básicas en un ambiente de desastre donde no puede haber intervención humana directa. El ambiente de intervención del robot es un ambiente desestructurado y con limitaciones de comunicación con la intención de asimilar las condiciones de una situación real de desastre en el interior de un edificio. El robot debe demostrar sus capacidades de movilidad, de manipulación de diferentes herramientas y de autonomía parcial para realizar las tareas propuestas.

La secuencia de las tareas a resolver es:

1. Primero, el robot debe conducir un vehículo especial por un trayecto (donde hay obstáculos y barreras) hasta acercarse a la entrada del ambiente de desastre.
2. El robot debe bajarse por sí solo del vehículo.
3. Luego debe dirigirse a una puerta con una manija, abrir la puerta y avanzar por un corredor.
4. El robot debe acercarse al sitio donde se encuentra una válvula circular y girarla 360 grados.
5. Después, el robot debe acercarse a un muro donde hay demarcado una geometría definida. El robot debe manipular un taladro para hacer un hueco alrededor de la geometría.
6. Luego, el robot debe desconectar un cable de una toma eléctrica y conectarlo en otra toma eléctrica.
7. Para salir de la zona de desastre, el robot debe desplazarse por un corredor abriéndose camino entre los obstáculos que pueda encontrar en el piso (tubos, palos de madera, bloques de ladrillo, bloques de cemento).
8. Por último, el robot debe subir por unas escaleras.

En la etapa final del DRC, participaron veintitrés equipos de todo el mundo. El equipo ganador fue KAIST de Corea, realizando todas las tareas en un tiempo de 44 minutos y veintiocho segundos, y cumpliéndolas satisfactoriamente (KAIST, 2015).

Por su parte, la iniciativa Cybathlon impulsa a investigadores y proveedores al desarrollo de tecnologías de asistencia que se muestren en prototipos funcionales para mejorar la calidad de vida y aumentar la autonomía de personas con limitaciones de movilidad —por ejemplo, con diferentes niveles de parálisis o con amputaciones de extremidades— (Novak, Wolf y Guglielmelli, 2017; ETH Zurich, 2016).

Estas tecnologías de asistencia se basan en la aplicación de teorías, métodos de solución, tecnologías y diseño que se vienen desarrollando en las disciplinas que apoyan la robótica, como la ingeniería, la medicina y el diseño industrial. Cybathlon se realizó por primera vez en el 2016 en Zúrich (Suiza), y consistió en competencias en seis categorías: carrera con prótesis de brazos accionadas (ARM), carrera con prótesis de piernas accionadas (LEG), carrera de exoesqueletos accionados (EXO), carrera de sillas eléctricas (WHL), carrera de bicicleta eléctrica de estimulación funcional (FES) y carrera de interfaces cerebro-computador (BCI).

En dichas competencias participaron 66 competidores y 56 equipos de desarrollo representando a veinticinco países. Cada categoría define sus retos basados

en tareas de la vida real. Las competencias se hicieron en un estadio acondicionado con asistencia del público para mostrar los avances en tecnologías de asistencia y crear conciencia en académicos, industriales y público general de la importancia del desarrollo de dispositivos asistidos con tecnologías para ayuda a personas con discapacidades.

Análisis del impacto de la robótica en la actualidad

De acuerdo con los casos de estudio presentados, la robótica hoy en día es un área del conocimiento que permite concebir y construir proyectos innovadores basados en tecnologías disruptivas que traen beneficios para las personas y las sociedades en diferentes actividades de la vida diaria. Sin embargo, uno de los aspectos más controvertidos por los críticos de la robótica y de la automatización es el relacionado con la generación de desempleo. Sí es cierto que hay tareas, principalmente rutinarias (en empresas que manejan grandes volúmenes de producción), que pueden ser realizadas por robots reemplazando mano de obra humana en fábricas e industrias. Sin embargo, hay casos ejemplares de empresas grandes que recurren al uso de robots en tareas automatizadas por robots y que ofrecen capacitaciones a sus trabajadores para aprender a realizar otras tareas y hacer su trabajo en otro puesto laboral.

Por un lado, hay una nueva demanda de empleo especializado en áreas que apoyan la robótica, debido a que se requiere de buenos profesionales en diferentes áreas del conocimiento para la formación de las nuevas generaciones y la creación de nuevas empresas innovadoras que conciben nuevos productos y proyectos que se apoyen en tecnologías desarrolladas en robótica. Así mismo, hay una vasta oferta de soluciones basadas en robótica, ya que generalmente aplican a contextos socioeconómicos bien definidos; por ejemplo, las problemáticas de interés, las condiciones de vida de las personas, las políticas sociales, las políticas de desarrollo tecnológico y los recursos disponibles en países desarrollados no son los mismos que los que se presentan en países en desarrollo (países emergentes).

Por otro lado, las disciplinas que contribuyen a la robótica están jalonando el avance de la ciencia en diferentes áreas como: creación de nuevos materiales, generación y uso de energías limpias, miniaturización de componentes electrónicos y mecánicos, infraestructuras de computación (como computación en la nube, computación móvil, computación de alto desempeño, dispositivos de interacción), procesamiento de altos volúmenes de información, infraestructuras de comunicación (alto desempeño, entre dispositivos), inteligencia artificial, etc. Esto traerá como consecuencia la concepción de nuevos proyectos, más ambiciosos, con mayores ventajas y beneficios para las personas en las áreas de transporte, seguridad, manufactura, prestación de servicios (medicina, entretenimiento, tareas domésticas, agricultura, minería, etc.), y educación e investigación, entre otras.

En cuanto a la globalización, grandes empresas y marcas han aumentado su capacidad de producción con estándares de calidad a través de la construcción de plantas de producción modernas que tienen un alto grado de automatización y robótica. Estas plantas se construyen principalmente en países en desarrollo, favoreciendo los costos. Y su producción alcanza mercados a nivel mundial, favoreciendo a los países desarrollados debido a que sus habitantes tienen mayor poder adquisitivo. Esto también favorece la transferencia de tecnología y el comercio internacional de bienes, servicios y capitales. De igual manera, la robótica favorece la creación de nuevas empresas emprendedoras y de innovación que ofrecen nuevos productos y servicios con mercados a nivel mundial.

La comunidad académica y de investigación de robótica (en crecimiento) ha consolidado espacios para difusión de sus avances en reconocidas asociaciones internacionales, conferencias internacionales dirigidas a investigadores y profesores, pero también en competencias internacionales donde el público general puede apreciar su aplicación en problemas reales.

Conclusiones

La robótica es una tecnología disruptiva porque por su desarrollo a lo largo de muchos años puede contribuir al día de hoy con soluciones que superan los desarrollos existentes a problemas reales. A su vez, la robótica ofrece las tecnologías para tratar problemas para los cuales no existen todavía soluciones o aún no son completamente satisfactorias. Estas soluciones basadas en robótica mejoran la seguridad y la calidad de vida de las personas o de los profesionales en diferentes áreas de interés para la sociedad, como lo son el transporte, la manufactura, la medicina, la prestación de servicios para el público general y profesional, la fabricación de bienes y la educación. Por su parte, la investigación motiva la creatividad para concebir y desarrollar sistemas robóticos extraordinarios que resuelven problemas complejos de la vida diaria de personas o profesionales.

Por otra parte, cada vez se tienen ambientes y espacios donde se encuentran soluciones basadas en robótica y se da la coexistencia de personas y robots. En estos casos, se han desarrollado robots con capacidades sociales que les permiten interactuar con personas y profesionales. La ayuda que ofrecen estos robots y sus capacidades de interacción hacen que sean cada vez más aceptados por las personas en su medio.

Así mismo, los avances que se dan en la tecnología (comunicaciones más eficientes y seguras, nuevas infraestructuras de computación, capacidades de computación de alto desempeño, creación de nuevos materiales, fabricación de componentes miniaturizados, definición y aplicación de estándares) favorecen desarro-

llos más eficientes y que se adaptan a las nuevas tendencias mundiales, como la interconectividad, la eficiencia en el uso de energía, el uso de energías renovables y limpias, y el uso de materiales y de componentes reutilizables y reciclables.

También, se destaca que hoy en día hay una comunidad académica e industrial muy grande trabajando en diferentes áreas de la robótica (robótica industrial, robótica quirúrgica, robótica con vehículos, robótica de servicios, robótica educativa, robótica de entretenimiento, robótica de asistencia a discapacitados, robótica espacial, robótica de rescate), buscando aprovechar las posibilidades que ofrecen los desarrollos tecnológicos para trabajar en proyectos disruptivos y ofreciendo mejores o nuevas posibilidades a las actividades y situaciones del día a día de personas y profesionales. Ya encontramos robots realizando labores peligrosas para las personas, labores rutinarias para las que hay cada vez menos personas dispuestas a realizarlas o labores con exigencias de precisión mayores a las que pueden lograr las personas. Y en la gran mayoría de estas actividades, los robots son asistidos por personas (público general o especialistas) para realizarlas de forma más segura o más eficiente.

A fin de continuar el desarrollo y el avance de las tecnologías y de proyectos de innovación, se requiere de la formación de profesionales en diferentes áreas de conocimiento. Por eso el interés de fortalecer el conocimiento de las áreas STEAM desde la educación primaria para atraer más jóvenes hacia las ciencias, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas, y prepararlos para ser los creadores de los proyectos del futuro. Esta política de educación sin duda va impulsar el desarrollo de las áreas de la robótica. Las posibilidades de nuevos proyectos también son la oportunidad de la creación de nuevas empresas de innovación.

Referencias

- Alkhatib, H., Faraboschi, P., Frachtenberg, E., Kasahara, H., Lange, D., Laplante, P., ... Schwan, K. (2015). What Will 2022 Look Like? The IEEE CS 2022 Report. *Computer*, 48(3), 68-76. DOI: <https://doi.org/10.1109/MC.2015.92>
- AMP Robotics (2017). *Robots for recycling*. Recuperado de <https://www.amprobotics.com>
- Asada, M. (2017). A Report on RoboCup 2017. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 24(4), 21-23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2757720>
- Christensen, H. I. (2016). *A Roadmap for US Robotics. From Internet to Robotics*. Recuperado de <http://jacobsschool.ucsd.edu/contextualrobotics/docs/rm3-final-rs.pdf>
- Coparm Srl (2015). *E-Waste Recycling Plants*. Recuperado de <http://coparm.net/e-waste-recycling-plants/>

- Danahy, E., Wang, E., Brockman, J., Carberry, A., Shapiro, B. y Rogers, C. B. (2014). LEGO-Based Robotics in Higher Education: 15 Years of Student Creativity. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(2). DOI: <https://doi.org/10.5772/58249>
- D'Andrea, R. (2012). A Revolution in the Warehouse: A Retrospective on Kiva Systems and the Grand Challenges Ahead. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(4), 638-639. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2214676>
- DARPA. (2015). *DARPA Robotics Challenge*. Recuperado de <http://archive.darpa.mil/roboticschallenge/index.htm>
- Eder, T. (2017). Nokia Saving Lives Project Wins the United Arab Emirates Drones for Good Award 2017. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 24(2), 91-92. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2691130>
- Estrada, F. J. (2017). Practical Robotics in Computer Science Using the LEGO NXT: An Experience Report. En *ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education* (pp. 329-334). DOI: <https://doi.org/10.1145/3059009.3059025>
- ETH Zurich (2016). *The Premiere Cybathlon 2016*. Recuperado de <http://www.cybathlon.ethz.ch/cybathlon-2016.html>
- Guizzo, E. (2014). Dean Kamen's "Luke Arm" Prosthesis Receives FDA Approval. *IEEE Spectrum*. Recuperado de <https://spectrum.ieee.org/automaton/biomedical/bionics/dean-kamen-luke-arm-prosthesis-receives-fda-approval>
- Team KAIST (2015). Biped Humanoid Robot DRC Hubo [video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=PomkJ4l9CMU>
- Krebs, H. I., Ferraro, M., Buerger, S. P., Newbery, M. J., Makiyama, A., Sandmann, M., ... Neville, H. (2004). Rehabilitation Robotics: Pilot Trial of a Spatial Extension for MIT-Manus. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 1(5). DOI: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-1-5>
- Louie, W-Y G., Vaquero, T., Nejat, G. y Beck, J. C. (2014). An Autonomous Assistive Robot for Planning, Scheduling and Facilitating Multi-User Activities. En *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5292-5298). DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907637>
- Magnenat, S., Shin, J., Riedo, F., Siegwart, R. y Ben-Ari, M. (2014). Teaching a Core cs Concept through Robotics. En *ACM Conference on Innovation & Technology in Computer Science Education* (pp. 315-320). DOI: <https://doi.org/10.1145/2591708.2591714>
- NASA Science (2018). *Mars Exploration Program*. Recuperado de <https://mars.nasa.gov>
- Novak, D., Wolf, P. y Guglielmelli, E. (2017). Cybathlon 2016: Showcasing Advances in Assistive Technologies through Competition. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 24(4), 24-122.

Pepper (2017). *SoftBank Robotics*. Recuperado de <https://www.ald.softbankrobotics.com/en/robots>

RoboCup (s. f.). *RoboCup Federation*. Recuperado de <http://www.robocup.org>

Sabattini, L., Aikio, M., Beinschob, P., Boehning, M., Cardarelli, E., Digani, V., ... Fuerstenberg, K. (2018). The PAN-Robots Project: Advanced Automated Guided Vehicle Systems for Industrial Logistics. En *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 25(1), 5-64. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2700325>

Sanbot (2017). *Qihan Technology Co*. Recuperado de <http://en.sanbot.com>

Tesla (2017). *Tesla Autopilot*. Recuperado de <https://www.tesla.com/autopilot>

Waymo (2017). *Google Self-Driving Car Project*. Recuperado de <https://waymo.com>

Las posibilidades de desarrollo de inteligencia artificial

Olga Lucía Quintero-Montoya

Resumen

En el contexto del posicionamiento amplio de la inteligencia artificial —gracias a los efectos de la globalización generados por las grandes empresas informáticas denominadas GAFA: Google, Amazon, Facebook y Apple—, es imperioso retomar los aspectos teóricos fundamentales, la variedad de aspectos técnicos, la relevancia de las aplicaciones en diferentes ámbitos y las implicaciones éticas alrededor de los sistemas inteligentes. En el marco de *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización*, este capítulo pretende que se desmitifiquen los aspectos que han idealizado el aprendizaje de máquina y la inteligencia artificial, y que se discutan los elementos que permiten que en el contexto mundial y nacional sean clave de los próximos desarrollos que aumentarán la capacidad económica de los países, los avances investigativos y el nivel de vida de los seres humanos.

Palabras clave: aprendizaje de máquina, calidad de vida, desarrollo sostenible, inteligencia artificial, investigación científica, globalización

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Quintero-Montoya, O. L. (2019). Las posibilidades de desarrollo de inteligencia artificial. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 195-213). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.8>

The possibilities of artificial intelligence development

Olga Lucía Quintero-Montoya

Abstract

In the context of the broad positioning of artificial intelligence —thanks to the effects of globalization generated by large computer companies called glasses: Google, Amazon, Facebook and Apple— it is imperative to take up the fundamental theoretical aspects, the variety of technical aspects, the relevance of applications in different areas and the ethical implications surrounding intelligent systems. In the framework of this book, this chapter aims to demystify the aspects that have idealized machine learning and artificial intelligence. At the same time, it invites to discuss the elements that allow the global and national context to be key to next developments that will increase the economic capacity of the countries, the research advances and the level of life of the human beings.

Keywords: machine learning, quality of life, sustainable development, artificial intelligence, scientific research, globalization

Introducción

En el marco del congreso mundial de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC, por sus siglas en inglés), celebrado en Toulouse en el 2017, tuve la oportunidad de experimentar la capacidad inimaginablemente aturdidora del efecto de la globalización y la tecnología al conocer de cerca grandes focos de desarrollo tecnológico, técnico y económico¹. No obstante, la experiencia más disruptiva fue al entrar a una librería en busca de lo que sería mi material de lectura en francés para mis próximos viajes. La preocupación de los franceses en cuanto al futuro y la forma en la que está cambiando rápidamente el trabajo y el modelo económico llevó a un grupo denominado *Les Économistes Aterrés* a escribir *Changer d'avenir reinventer le travail et le modele économique* (2017). Con un título tan revelador, lo menos que pensé encontrar fue una posición que determinó mi deseo de contribuir a este libro.

Les Économistes Aterrés son un colectivo de economistas y ciudadanos que se dedican a impulsar la reflexión colectiva y la expresión pública de los economistas que no se resignan a la dominación de la ortodoxia neoliberal. Sencillamente, al avanzar en el libro, me encuentro con una interesante proclamación:

Debido a los GAFA, las grandes empresas de informática que son Google, Amazon, Facebook y Apple, vivimos los primeros momentos de una aceleración de progreso técnico sin precedentes desde el campo de la robótica y de la inteligencia artificial. Durante mucho tiempo, y aún hoy en día, la mayoría de las veces los robots eran muy eficientes para una tarea muy particular, eran incapaces de aprender y de realizar operaciones muy simples para un ser humano. Pero esto deberá cambiar rápidamente gracias al 'deep learning', la inteligencia artificial y las redes neuronales que permiten a las máquinas aprender por sí mismas, incluso para ser creativas, lo que sugiere que la era de los robots inteligentes solo es una cuestión de tiempo. (*Les Économistes Aterrés*, 2017, p. 24)

1 <https://www.toulouse-metropole.fr/>

A la apreciación anterior yo le agregaría los efectos de la empresa cinematográfica y de la televisión², y de la masificación de servicios en línea, que hacen que las personas dependan cada vez más de la tecnología para la toma de decisiones³. Sin embargo, es debido que tengamos en cuenta que la inteligencia artificial no es un área nueva del conocimiento y que mucho menos es un invento de la televisión.

En este capítulo, pretendo retomar los aspectos teóricos fundamentales, la variedad de aspectos técnicos, la relevancia de las aplicaciones en diferentes ámbitos y las implicaciones éticas alrededor de los sistemas inteligentes.

De este modo, se presenta primero una revisión corta del comienzo del desarrollo de los sistemas inteligentes, luego se hace una revisión cronológica de estos sistemas con discusiones que proveen al lector elementos básicos de discusión, para después avanzar a la sección de perspectivas, que continuará en la sección del análisis de las posibilidades de desarrollo de la inteligencia artificial desde puntos de vista teóricos y aplicados. Antes de concluir, presentaremos nuestra posición para que sea aceptada o debatida por el lector en la sección final del documento. Las principales referencias usadas serán encontradas en la sección de bibliografía y algunos vínculos de interés en las notas al pie de página.

El comienzo del desarrollo

Históricamente, el control automático y la robótica permitieron el aumento de la capacidad productiva a nivel industrial y aceleraron el crecimiento de las grandes economías del mundo. Como concepto, el control automático puede traer consigo diferentes problemas cuando la misión es desarrollar máquinas y herramientas que realicen tareas repetitivas que antes eran desarrolladas por operarios, y son problemas que plantean cuestiones éticas sobre la cantidad de trabajos que se eliminan.

Una de las premisas de la automatización era aumentar la calidad del puesto de trabajo, de modo que un operario dejara de realizar una tarea aburridora —que lo pondría potencialmente en peligro— para pasar a tareas de supervisión y control en las que las decisiones humanas fueran fundamentales. Estas decisiones no podrían ser tomadas por la máquina que solamente funge de ayudante y

2 Hace poco, fui invitada a un conversatorio de estudiantes de diferentes programas para hablar de la inteligencia artificial. Al preguntar qué sabían de ella, los estudiantes se refirieron a una serie de Netflix y a algunas películas, pero ninguno tenía ideas formales del asunto.

3 Quienes para ir de un lugar a otro dejan toda la definición de la ruta a su aplicación, que les hace dar tres vueltas para llegar al lugar; o quienes compran solo las sugerencias de zapatos que salen en sus aplicaciones móviles o en su casilla de correo electrónico.

propende al aumento de la velocidad, la eficiencia y la eficacia de ciertas labores en puestos de trabajo.

Los aspectos teóricos y los avances en la materia llevaron a la industria a hacer inversiones millonarias en cuyos grandes centros de investigación se lograron los avances que llevaron a las potencias a sus actuales niveles de desarrollo económico. Sin embargo, inicialmente la toma de decisiones seguía siendo parte del trabajo de los humanos, puesto que los robots no eran capaces de realizar tareas simples para un niño de 3 meses como es reconocer la cara de su madre.

El ser humano y su complejo esquema de razonamiento, aprendizaje y toma de decisiones se convierten en la meta que eventualmente puede permitir que las máquinas robóticas logren el máximo de la curva de productividad y eficiencia. No obstante, imitar el cerebro humano no es tan “relativamente” sencillo como imitar el funcionamiento de sus brazos para pintar un auto de alta gama o un avión⁴.

La composición de los esquemas de razonamiento, la creación y el desarrollo de la inteligencia, luego de la Segunda Guerra Mundial, fueron (y aún lo son) el santo grial de los teóricos y prácticos, porque con ello se perfeccionarían (en el sentido humano) las tareas que ya estaban completamente cubiertas en cuanto a repetitividad. Además, evitarían que las vidas de expertos humanos entrenados por muchísimas horas fueran arriesgadas en misiones de alta peligrosidad, poniendo en desequilibrio los sistemas militares de alto nivel. Las funciones humanas como la creatividad, el perfeccionamiento de esquemas de toma de decisiones grupales, el reconocimiento de patrones u otras aún no estaban automatizadas y es real que se necesitaba avanzar al siguiente nivel.

Los algoritmos inteligentes

Como campo, la inteligencia artificial se gestó en medio de los desarrollos teóricos y prácticos de la teoría de control cuando en los años sesenta ingenieros, matemáticos y físicos como los formados por John Ralph Ragazzini y Lofti Zadeh⁵, y otros como el neurólogo Warren McCulloch y el lógico Walter Pitts, comenzaron a plantear los fundamentos teóricos de los sistemas difusos (*fuzzy sets*) y de las redes neuronales

4 https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Aerospace-Manufacturing-on-Board-with-Robots/content_id/5960

5 Entre sus múltiples galardones y reconocimientos se encuentra el Premio Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento 2012, en la categoría de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), “por la invención y el desarrollo de la lógica difusa”.

(*artificial neural networks*), buscando desarrollar estrategias que permitieran entender cómo el cerebro realiza tareas.

La base del razonamiento lógico bajo incertidumbre y el principio de aprendizaje por entrenamiento fueron solidificándose hasta alcanzar, en los noventa, un auge que era objeto de los intereses científicos de muchos institutos a lo largo y ancho de la comunidad científica. Durante aquella época, se desarrollaron los conceptos y algoritmos que ahora son la base de lo que hoy se denomina analítica de datos, el procesamiento de datos e información y el aprendizaje profundo.

La aparición de un nuevo concepto de conjuntos que reclamara poseer una mejor entropía que la teoría de probabilidad clásica parecía escandalosa; y con ello, una nueva forma de lógica y operadores que permitieran la computabilidad de reglas de conocimiento revolucionó la forma como se daba razonamiento a los algoritmos. Elementos lingüísticos, psicológicos, ingenieriles y matemáticos se cohesionaron en una nueva teoría. La Universidad de California en Berkeley poseía los mejores teóricos y prácticos que llevaron a la industria los conceptos *fuzzy*. Fue entonces cuando el mundo se convirtió en un mundo tecnológico inteligente (Zadeh, 2005).

El reconocimiento académico de los sistemas difusos comienza a consolidarse en 1978 con la creación de la revista científica *Fuzzy Sets and Systems*, la cual recopila el avance de la teoría y la aplicación de los conjuntos y sistemas difusos. La teoría de los conjuntos difusos ahora comprende un cuerpo bien ordenado de nociones básicas que incluyen operaciones de agregación, teoría generalizada de relaciones, medidas específicas de información y cálculo de números difusos. Los conjuntos difusos constituyeron la piedra angular de la teoría no aditiva de incertidumbre (teoría de posibilidad) y los sistemas difusos basados en reglas fueron una herramienta versátil para modelado lingüístico y numérico.

En matemáticas, los conjuntos difusos han impulsado nuevos tópicos de investigación en conexión con la teoría de categorías, topología, álgebra y análisis. Los conjuntos difusos son también parte de las más recientes corrientes que se orientan al estudio de medida generalizada e integrales y son combinados con métodos estadísticos. Así mismo, los conjuntos difusos han fortalecido los elementos en la lógica multivaluada.

En el campo de procesamiento de información, los conjuntos difusos son importantes en agrupamiento, análisis de datos y fusión de datos, reconocimiento de patrones y visión. El modelado basado en reglas difusas se ha combinado con otras técnicas como las redes neuronales y la computación evolutiva aplicada a sistemas y con aplicaciones en robótica, control de procesos complejos y supervisión.

Las máquinas comenzaron a razonar con base en incertidumbre definida conforme a sus sistemas de reglas, y los sistemas de supervisión y controles expertos comenzaron a erigirse entre las industrias más avanzadas que requerían mejoramientos exponenciales en sus indicadores y disminución de fallas. Más aún, el nivel de incertidumbre contenida en las variables medidas y las nociones de la posibilidad de que un elemento pertenezca a uno o más grupos trajeron consigo algoritmos que de manera semisupervisada entregan patrones de comportamiento sobre un conjunto desconocido de datos.

La teoría de la información de Shannon aportó la capacidad de simplificar, contraer y obtener representaciones compactas de datos que provenían del mundo real. La construcción de modelos caja negra que pudieran ser fácilmente usados en esquemas de control en lazo cerrado y supervisión fueron posicionándose en las telecomunicaciones, la energía, la economía, y no es por demás afirmar que como resultado de los avances en materia espacial dependieran del avance teórico y la capacidad práctica de quienes se esforzaron en desarrollarla.

La inteligencia artificial es mucho más que el imaginario de las máquinas que dominan el mundo y contienen a los humanos en una matriz. El universo de la mente humana, con su capacidad de aprender y crear, es el objeto de investigaciones previas y actuales. “*Learning as compression of information*” fue como lo definió Rissanen en el marco del *Minimum Description Length Principle* o máxima sobre la cual el área completa se mueve (Rissanen, 2010). Pero ¿qué es compresión de información? ¿Qué es información? ¿Cómo los humanos la extraen de manera natural y la usan para tomar decisiones?

Para hacer una breve revisión de los principales elementos de los algoritmos inteligentes, es necesario presentar al lector una perspectiva histórica/técnica. El mundo de los sistemas expertos, que buscan imitar la experticia humana ya sea para supervisar o alertar ciertos patrones de comportamiento de un sistema dinámico a partir de sus datos o reglas, se ha posicionado en revistas científicas que publiquen artículos relacionados con todos los aspectos de la ingeniería del conocimiento, incluyendo métodos individuales y técnicas en adquisición y representación de lenguaje y su aplicación en la construcción de sistemas.

Tradicionalmente aplicados en ingeniería de *software* e interacción humano-máquina, hace poco se ha despertado un interés en crecientes mercados para este tipo de tecnologías como los negocios, la economía, las investigaciones de mercado y el cuidado médico y de salud (Hurtado, Quintero y García, 2014; Mejía, Quintero y Castro-Martínez, 2015; Quintero *et al.*, 2015).

En torno al aprendizaje de máquina y a la inferencia bayesiana, es innegable que su esfuerzo ha sido conseguir algoritmos que, con base en información

a priori y unas distribuciones asumidas, obtienen representaciones que permiten que se vuelvan a generar los datos con el menor error de estimación posible. El reto es proponer modelos compactos y obtener los parámetros de las distribuciones a partir de los datos.

Por otro lado, algunos aspectos del reconocimiento de patrones han sido abordados por medio de algoritmos de agrupación que, de manera natural, imitan la capacidad de abstraer o construir una simplificación de un ambiente nuevo para los seres humanos, realizando obvias aproximaciones a grupos que minimizan la distancia entre sus miembros y maximizan la distancia entre ellos. Aplicaciones relevantes aparecen en minería de datos y procesamiento del lenguaje natural (Quintero *et al.*, 2014).

En cuanto al aprendizaje estadístico como área de desarrollo, es esencial mencionar la frase célebre de William Edwards Deming: *"In god we trust, all others bring data"*. Esta premisa nos indica que con una gran fundamentación estadística y de geometría diferencial, es posible pensar la construcción de modelos basados en *kernels* que a partir de los datos permitan acercarse a la realidad. Tal es el caso de métodos lineales para regresión y sus generalizaciones, métodos lineales para clasificación y sus expansiones básicas, y regularización y suavizado (*smoothing*) de *kernels* estadísticos.

Aspectos relacionados con el aprendizaje estadístico comprenden modelos aditivos, árboles y métodos relacionados como bosques aleatorios. Y en cuanto al aprendizaje estadístico no supervisado, es posible listar los algoritmos de agrupamiento espectral, análisis de componentes principales con *kernels* y disperso, reducción de dimensiones no lineal y hasta el algoritmo Google PageRank. Vapnik, el padre de las máquinas de soporte vectorial, mencionaba que *"no hay nada más práctico que una buena teoría"* y basó sus desarrollos en principios de inferencia estadística, en estadística bayesiana y en el principio de longitud mínima de descripción proveniente de la teoría de información.

En relación con el poder de discernimiento de los seres humanos en materia de clasificación, los desarrollos de algoritmos con *kernels*, lineales y no lineales, han permitido mezclas interesantes de aproximaciones estadísticas y probabilísticas y la consolidación del aprendizaje estadístico que facilita a las máquinas diferenciar clases de datos.

No obstante, la preocupación acerca del tipo de datos sobre el cual se deben tomar decisiones inteligentes ha permitido el desarrollo de estrategias de extracción de características que, en su mayoría, tienen bases en los enfoques temporal, frecuencial y espacial del procesamiento de señales, análisis de Fourier y las familias

de *wavelets*, como la solución a la ecuación del calor (Sierra-Sosa *et al.*, 2016; Gómez-Montoya *et al.*, 2016).

Actualmente, existe un muy elegante conjunto de algoritmos que han intentado emular el desarrollo natural de un humano y que distinguen, aproximan, pero no necesariamente dominan, una tarea. Un nivel de aproximación diferente trae consigo la posibilidad de imitar los conjuntos de unidades neuronales, trabajando de modo que se refuercen sus conexiones para especializar la realización de dicha asignación.

La noción de compresión de información no se ha abandonado, pero el concepto de aprendizaje se reformula con base en la supervisión y el entrenamiento. Bien o mal, se poseen representaciones crudas o procesadas del mundo real y pistas que permitan aparear impulsos de entrada a los sistemas con las señales que se obtienen de él.

¿Por qué no entonces proponer una forma de aprendizaje que logre encontrar una representación de modo que sea la repetición de la tarea lo que lo convierta en experto y no sea necesariamente una lista de reglas de comportamiento?

Paralelo al trabajo de los sistemas difusos, los paradigmas de interconexión neuronal y los modelos de potenciales arquitecturas se desarrollaban de forma veloz. El entendimiento de los procesos cognitivos y funcionales del cerebro (desde perspectivas evolucionistas, neurológicas y biológicas) trajo consigo un amplio desarrollo teórico y práctico del concepto de aprendizaje y algoritmos basados en *kernels*, los cuales inspiraron la formulación de las redes neuronales que requieren de esquemas de optimización para obtener el conjunto paramétrico adecuado para realizar la tarea para la que están siendo entrenadas (Linnainmaa, 1976).

La teoría matemática que soporta estos desarrollos en redes neuronales como aproximadores de funciones tiene una perspectiva diferente a la del aprendizaje estadístico, con un soporte matemático determinístico en la geometría diferencial.

Aproximaciones a la arquitectura del tejido neuronal permitieron el perfeccionamiento de los ‘perceptrones multicapa’ y el desarrollo del algoritmo de aprendizaje de retropropagación del error (*back-propagation*), que se basa en la solución del problema de minimización del promedio de energía instantánea del error de todos los posibles patrones que debe aprender la red (Schmidhuber, 2015).

Nuevas arquitecturas con diferentes funciones especializadas se originaron; de allí que con funciones de activación de base radial como las gaussianas, la información se propaga a través de la red de una sola capa oculta, con lo que entonces se logró la solución a los problemas de interpolación exacta, aunque con dificultades de cómputo y dimensionalidad. Sin embargo, su uso se extendió desde las finanzas hasta los sistemas híbridos con microceldas (Baghaee *et al.*, 2017).

En cuanto a sistemas con señales de alta frecuencia, las aplicaciones económicas comenzaron a dar problemas, puesto que la cantidad de energía e información contenida en ellas no era fácilmente representable. Se propusieron las redes *wavelet*, cuya arquitectura permitía hacer conexiones hacia adelante directamente entre la capa de entrada y la de salida usando funciones *wavelet* como funciones de activación (Rakhshandehroo *et al.*, 2017; Masood *et al.*, 2017).

En 1993, Jang se cuestionaba cómo extraer lo mejor de los dos mundos logrando la capacidad de manejar la incertidumbre de los sistemas difusos y la genialidad del entrenamiento que permitía mayor precisión en la tarea. Los sistemas adaptables neurodifusos ANFIS (por sus siglas en inglés) ofrecieron en dos pasos minimizar el problema de la selección de la forma de las categorías o conjuntos difusos y estimar los parámetros de la red neuronal. Su único problema podría ser la relevancia de la selección de las potenciales entradas al problema que se deseara resolver. No obstante, este sigue siendo un modelo adecuado y ampliamente usado en el mundo de los sistemas de potencia (Karaboga y Kaya, 2018).

Si bien los ANFIS representan una solución a algún tipo de problema, requieren de patrones bien definidos para lograr su máximo desempeño. Recientemente, y gracias al aumento de la dimensionalidad de los datos, y con ello de la carencia de patrones de entrada-salida en algunas de las aplicaciones, obligaron a retomar conceptos desarrollados a finales de los ochenta. El aprendizaje profundo dio sus primeros pasos con las arquitecturas de autocodificadores (*autoencoders*) en cascada, cuyo valor agregado radica en que son un algoritmo no supervisado que aplica el algoritmo de *back-propagation* para dar salidas iguales a las entradas. Si algunas de las entradas están correlacionadas, entonces el algoritmo está en capacidad de descubrir algunas de estas correlaciones.

De hecho, este simple autocodificador con frecuencia termina aprendiendo una representación de bajas dimensiones muy similar a la que se obtiene con el análisis de los componentes principales. Pero aunque el número de neuronas ocultas sea grande, algunas veces mayor que el número de entradas, es posible descubrir estructuras interesantes imponiendo restricciones en la red.

Una de las aplicaciones que más representaba retos fue el procesamiento, la identificación y el análisis de imágenes. La visión artificial que se estaba desarrollando requirió echar mano de la capacidad de simplificación de la información de las arquitecturas que, como los autocodificadores, hacían la tarea de extracción y selección de características. Se comenzaron a desarrollar nuevas arquitecturas que aprovechaban las capacidades de simplificación de *kernels* bidimensionales con la habilidad de los ‘perceptrones multicapa’ de establecer relaciones no lineales.

A posteriori, las ‘redes convolucionales’ resultaron ser las primeras soluciones al problema de la baja propagación del error (que ocurre gracias a la disminución de los gradientes locales de las neuronas de las capas de entrada al aumentar el número de capas ocultas) y al problema de falta de patrones y necesidad de simplificar la información. Estas redes se estructuran a partir de bloques de ‘convolución’, no linealidad (ReLU), *pooling* o submuestreo y clasificación con una red neuronal completamente conectada como un ‘perceptrón multicapa’.

Su particular arquitectura imita la forma con la que los seres humanos construimos patrones que nos permiten reconocer objetos y generalizar esta función. Algo así como cuando se le enseña a un niño la diferencia entre una mesa, una butaca y una silla cuando todas pueden tener cuatro patas y, en consecuencia, a distinguir cuáles son las características relevantes y no comunes a ellas que permiten diferenciarlas.

El objetivo primario de la capa de convolución es extraer rasgos de la imagen de entrada; la convolución preserva la relación espacial entre los píxeles, aprendiendo las características de la imagen usando cuadrados pequeños de los datos de entrada. La capa de no linealidad permite que las características extraídas se distribuyan en un espacio de manera tal que sean mayormente diferenciables. El submuestreo reduce la dimensionalidad de cada mapa de características, pero retiene la información más importante, que puede ser el máximo, el promedio, la suma, etc. La clasificación se realiza con un ‘perceptrón multicapa’ tradicional con funciones de activación *softmax* o máquinas de soporte vectorial con *kernels* no lineales si hace falta. Las redes convolucionales más famosas son, entre otras: LeNet 1990, Alexnet 1012, ZF net 2013, GoogLeNet 2014, vggNet 2014, ResNets 2015 y DenseNet 2016.

Perspectivas

Hasta aquí, el lector puede inferir que todos los avances en el área que han llevado a que los algoritmos reconozcan objetos, diferencien patrones, ubiquen tendencias y hasta hagan sugerencias de compra son el fruto de desarrollos científicos interdisciplinarios que buscan representar cómo el ser humano aprende, infiere y toma decisiones.

Las cuestiones que resultan de ello pueden verse en dos perspectivas. La primera de ellas se relaciona con las preguntas teóricas sobre el aprendizaje y la forma como estos algoritmos aprenden y simplifican información; y su meta es encontrar una receta mágica que explique por qué y cómo reproducir las complejas interacciones que tienen lugar en el cerebro y que matemáticamente pueden ser generalizables. La segunda perspectiva aborda las implicaciones éticas alrededor

de la capacidad de las máquinas de emitir sugerencias para que el humano tome decisiones.

Sobre esta segunda cuestión debe mencionarse que efectivamente estamos en una era en la que el manejo de datos e información hace vulnerable a los seres humanos, y su uso es aún más sensible y susceptible a ser desviado hacia tendencias y gustos. Así fue como en marzo del 2018 uno de nuestros GAFA se vio envuelto en el escándalo del mal uso o desvío de datos e información con propósitos diferentes a los de nuestro gigante bajo el supuesto de un adecuado manejo de los datos (con los cuales los algoritmos aprenden). Entonces, ¿cuál debería ser el correcto uso o enfoque de los nuevos desarrollos teóricos y prácticos de la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina?

En cuanto a la inteligencia artificial, continuamos haciendo esfuerzos que van desde el estudio de *kernels* de difusión, hasta el estudio de representaciones compactas de grandes cantidades de datos en forma de grafos generados con métodos basados en entropía. Los estudiantes de muchas universidades del primer mundo y colombianas unen sus esfuerzos para comprender la capacidad de simplificación de diversas arquitecturas y luchan por lograr una teoría generalizable. Es innegable la contribución de la industria aeroespacial a este respecto, pero no nos enfocaremos en ello, quedémonos en el planeta por algunos párrafos más.

Análisis de las posibilidades de desarrollo

Respecto a los aspectos teóricos y prácticos del desarrollo del área, a continuación citaré lo que considero que debería ser el futuro de la inteligencia artificial a nivel mundial y que en Colombia viene avanzando de manera concreta y contundente.

Recientemente, se han planteado las metas de desarrollo sostenible, y con la explosión de la fama de la inteligencia artificial, la sociedad ha comenzado a preguntarse cuál puede ser su contribución. Pensando el área como una extensión de las potencialidades del ser humano, es natural entonces desarrollarla en pro y con los valores que permitan acelerar y propiciar el cumplimiento de estas. La inteligencia artificial puede proveer ubicación en tiempo real de recursos a través de análisis de mapas satelitales y análisis de datos de pobreza, apoyando investigaciones en econometría espacial.

Con trabajo interdisciplinar con agrónomos y biólogos, usamos técnicas de aprendizaje activo y aprendizaje de máquina para apoyar el incremento de la productividad mediante modelos predictivos de crecimiento y monitoreo de cultivos, logrado a partir de análisis y procesamiento de imágenes remotas en diferentes longitudes de onda de fuentes como drones, satélites o robots.

Si damos una mirada a nuestro alrededor, podemos pensar en el uso de todos los datos que la tecnología recoge por nosotros para monitorear nuestra salud y desarrollar programas preventivos y predictivos de enfermedades. Actualmente, trabajamos para desarrollar *kernels* de procesamiento que permitan nuevas y mejores arquitecturas de aprendizaje profundo y que lleven a nuevos paradigmas científicos en imagenología médica para diagnóstico y tratamiento de enfermedades como cáncer, Alzheimer o Parkinson. Interactuando con profesionales en biomedicina y bioingeniería, hemos avanzado en el diseño de dispositivos que con algoritmos inteligentes faciliten compensar y tratar la discapacidad, aumentar capacidades físicas y proporcionar más conocimiento. Una meta más ambiciosa para la inteligencia artificial puede ser identificar y corregir los sesgos en el género a fin de empoderar a la mujer para su crecimiento y nuevas oportunidades.

Sistemas de enseñanza afectiva, que usan la información recogida en el aula de clase para mejorar la experiencia y la interacción profesor-alumno, han comenzado a ser el centro de atención de varios investigadores. Necesariamente, hemos tenido que convertir algoritmos de reconocimiento de emociones en bioseñales y desarrollar arquitecturas de realimentación. La detección temprana de factores de deserción y la virtualización de la educación son efectivamente focos de desarrollo de la inteligencia artificial.

Las redes de sensores que están instaladas en todos lados y conectadas a Internet pueden alimentar un gran sistema de inteligencia artificial que permita predecir la identificación de patrones de consumo y de sanidad de fuentes de agua. Algunos colegas en la Universidad de Delft, en Países Bajos, pero también en la Universidad Nacional de Colombia, están trabajando fuertemente en algoritmos para redes de energía inteligentes, aumento de la eficiencia y análisis en tiempo real.

Aplicar el aprendizaje de máquina en las ciencias de la Tierra permite que se aumente la capacidad de mejorar modelos atmosféricos, químicos y climáticos que ayuden a la toma de decisiones y apoyen la planeación de las ciudades en cuanto a su desarrollo sostenible y a su impacto en el cambio climático a nivel local, regional y global. En las ciencias biológicas, los expertos están interesados en entender dinámicas ecológicas como migraciones, niveles de población, actividades de caza y dar soluciones para ecosistemas sostenibles, y en este caso, las técnicas de reconocimiento de patrones y la teoría de juegos tienen un papel fundamental.

En Colombia, todas las acciones anteriores están en curso e incluso las instituciones están tomando acciones para fortalecerse en materia de seguridad y justicia. La creatividad, la productividad, el uso del tiempo y la mejora en la calidad del ambiente de trabajo pueden ser también perspectivas de desarrollo

que lleven al crecimiento económico, a la innovación y a la creación de nueva infraestructura.

Localmente, tenemos ejemplos de desarrollo práctico en algunas *startups* que prestan servicios de *delivery* en ciertas ciudades del mundo. Sus asistentes robotizados necesitan perfeccionar su trabajo de reconocimiento de elementos del entorno que mejoren su capacidad de cumplir sus misiones de manera independiente usando visión por computadora. Y por otro lado (ojalá de manera conjunta), los académicos pueden publicar sus nuevos desarrollos en el *International Journal of Computer Vision*, que continúa siendo una de las primeras en los *rankings* internacionales de publicaciones, junto con *Autonomous Robots*.

El reconocimiento de patrones en señales de mercado —que vienen realizando varios equipos de analítica de diversas compañías colombianas— enfrenta retos análogos a los que se publican normalmente en el *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Este es otro ejemplo de focos de desarrollo conjunto tanto teórico como práctico.

La necesidad de mejorar el servicio en algunos negocios impulsa a equipos interdisciplinarios a diseñar y a mejorar los algoritmos actuales de reconocimiento de emociones en audio, con capacidad de aprender el lenguaje natural. La relación entre los elementos de almacenamiento de datos y la forma de describirlos se explora ampliamente y continúa siendo objeto de estudio como en los artículos que se publican en el *Journal of Memory and Language*.

Pese a la explosión técnica y teórica en las ciencias matemáticas, el campo de desarrollo de interfaces humano-robot, humano-máquina y humano-computador continúa aunando esfuerzos interdisciplinarios cuyo eje central es el ser humano y en los cuales participan neuropsicólogos, genetistas, bioingenieros y físicos.

Desarrollos en materia de reconocimiento de emociones en señales fisiológicas como microexpresiones faciales, voz, electroencefalogramas, fusión de datos con señales de electrocardiogramas, temperatura y sudoración corporal se vienen trabajando en nuestro país, y a nivel mundial continúan siendo un reto que mueve el campo de la inteligencia artificial y del aprendizaje de máquina, en el cual participan equipos de todo el mundo. Sus hallazgos se publican ampliamente en las revistas *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, *Cognitive Psychology*, *Cognitive Science*, *International Journal of Robotics Research*, *Physics of Life Reviews* y *Knowledge-Based Systems*.

Contribuciones teóricas y prácticas de nuevas arquitecturas especializadas en tareas particulares como, por ejemplo, dar inteligencia a asistentes robóticos automáticos (RPA, en inglés) son un reto no solo algorítmico, sino también de esquemas

de razonamiento. Este tipo de avances se actualizan continuamente en *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *Foundations and Trends in Machine Learning*, *Neural Networks* y *Networks and Spatial Economics*.

En torno al análisis de grandes cantidades de datos para seguridad o diseño de esquemas de mercado, el país no se queda atrás. Si bien grandes empresas como IBM, EMC y SAS ofrecen soluciones a nuestras empresas e instituciones locales, se están configurando equipos que resuelvan estos problemas a medida y de manera independiente, dejando el conocimiento instalado en el país. De manera contundente, sus algoritmos pueden ser candidatos a contribuciones en revistas como *Artificial Intelligence*, *Information Sciences* y *Pattern Recognition*.

Electrodomésticos que en el futuro podrán dar soluciones al adulto mayor que vive solo en su casa están siendo dotados (en Colombia) de inteligencia que se desarrolla continuamente y que por lo general se puede encontrar en las publicaciones *Fuzzy Sets and Systems*, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, *International Journal of Approximate Reasoning* y *Expert Systems with Applications*.

Un lector curioso podría husmear los títulos de los artículos más leídos de las mencionadas revistas y quedaría maravillado por la creatividad humana. Todas las áreas de la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina continúan en constante desarrollo teórico y práctico, y se siguen desarrollando aplicaciones que deberían, en principio, apoyar a los seres humanos.

Mis focos favoritos están relacionados con: el aumento de la calidad de vida de pacientes con discapacidad, el diagnóstico temprano de enfermedades del espectro afectivo, el diagnóstico temprano de conductas irregulares como maltrato infantil y el apoyo al mejoramiento de los procesos educativos (Rudovic *et al.*, 2018; Akputu, Seng y Lee, 2018; Kim y Jo, 2018).

Evidentemente, la inteligencia artificial como campo posee claras posibilidades de desarrollo no solo en cuanto a los aspectos teóricos, sino también en los prácticos. Tiene sus raíces en ciencias duras y formales, y gracias a la globalización y al avance económico que ha revolucionado la capacidad de cómputo, es hoy en el 2019 que el mundo reclama explicaciones y soluciones de ella para los grandes problemas de nuestro tiempo.

La formación científica y técnica en nuestro país debe aprovechar este momento de fama que hace que las sociedades y los tomadores de decisiones miren hacia el futuro de la humanidad, que es básicamente poner su inteligencia en un estadio posterior de evolución tecnológica. Gracias a unos pocos que han formado profesionales competentes, hoy en día somos focos de reclutamiento de grandes empresas que buscan recursos humanos económicos para ser competitivos.

Surgen varias preguntas al respecto: ¿debemos ser una fuente de recursos para la competitividad y el crecimiento económico de otras naciones?, o ¿debemos prestar atención a contribuir al desarrollo de iniciativas de empresas que están trabajando fuertemente a nivel local para propulsar la exportación de sus productos? Mientras no se tomen decisiones sobre la segunda, podremos hacer que nuestros profesionales logren experiencia y se incorporen al mundo laboral mediante la primera. Sin embargo, es necesario mejorar la calidad de la enseñanza y el logro de las capacidades en inteligencia artificial y aprendizaje de máquina en nuestras instituciones.

Una combinación adecuada de investigación básica, desarrollo tecnológico e innovación en la universidad, la empresa y el Estado ofrecerá a la nación un futuro económico que se alinee con las metas de desarrollo sostenible y que además aumente la calidad de vida de la población que espera ilusionada un escenario sin conflicto. La inteligencia artificial es la respuesta y lo ha sido desde hace mucho tiempo. Probablemente, el desarrollo del país puede yacer en nuestra capacidad de usar sabiamente lo que sabemos y en potencializar las capacidades locales.

Conclusiones

Es innegable que, gracias al fenómeno de la globalización y el posicionamiento de Internet, la inteligencia artificial ocupa un papel predominante en el pensamiento actual. Si no fuera por el uso diario de los gigantes tecnológicos GAFAM, no podríamos sentirnos estupefactos ante dispositivos que pueden reconocer una cara o comprar zapatos que mágicamente reúnen todas las características que deseamos, o también acceder en cuestión de milisegundos a las fuentes y preferencias que hemos decidido compartir con nuestros contactos.

La preocupación de muchos acerca de algoritmos implantados en máquinas inteligentes ya no es tan grande cuando los seres humanos han disminuido —en vez de aumentar— su potencial de manejo, dejando a sus dispositivos y a los algoritmos en ellos contenidos tomar decisiones tales como elegir la ruta para ir de un lugar a otro sin haber dado tres vueltas innecesarias para lograrlo.

Sin embargo, aún hay posibilidades de desarrollo de sistemas más inteligentes que los humanos, gracias a que existen otros preocupados por desarrollar nuevos y mejores cuerpos teóricos para formular algoritmos que, mediante las máquinas correctas, podrán aumentar nuestra calidad de vida en el planeta.

Desde un punto de vista investigativo, la solución a los retos actuales de aprendizaje debe estar basada en una fundamentación matemática que explique principios físicos y habilidades ingenieriles que catalicen estos desarrollos. Todavía

el aprendizaje profundo no es un campo consolidado científicamente, seguimos trabajando en ello.

Nuestro país necesita un libro escrito para soportar la enseñanza de la inteligencia artificial en sus universidades. Muchos estudiantes universitarios tendrán trabajos en industrias aplicando su experticia a problemas del mundo real en la nación, en vez de tener trabajos de investigación básica. El material necesita ser estructurado de manera que un profesor pueda enseñar directamente de él y que los estudiantes aprendan lo necesario para construir la economía de Colombia.

Se acerca una revolución de la información cuyo impacto en la sociedad será tan grande como la revolución de la agricultura o la revolución industrial. Es de vital importancia para el país que los programas académicos con inteligencia artificial y otras áreas afines aumenten a un estatus de calidad mundial. Este material de enseñanza-aprendizaje debe ser escrito en un estilo claro y debe enfatizar en forma coherente en lo que debe ser pensado para llevar a Colombia a la era de la información.

Referencias

- Akputu, O. K., Seng, K. P. y Lee, Y. L. (2018). Affect Recognition for Web 2.0 Intelligent E-Tutoring Systems: Exploration of Students' Emotional Feedback. En Information Resources Management Association (Ed.), *Student Engagement and Participation: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 338-368). Bolzano: IGI Global.
- Baghaee, H. R., Mirsalim, M., Gharehpetan, G. B. y Talebi, H. A. (2017). Nonlinear Load Sharing and Voltage Compensation of Microgrids Based on Harmonic Power-Flow Calculations using Radial Basis Function Neural Networks. *IEEE Systems Journal*, 12(3).
- Bustamante, P, López Celani, N., Quintero, O. L. y Pérez E. (2015). Recognition and Regionalization of Emotions in the Arousal-Valence Plane. En *Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 6042-6045). DOI: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319769>
- Les Économistes Atterrés (2017). *Changer d'avenir; réinventer le travail et le modèle économique*. París: Les Liens Qui Libèrent (e-book).
- Gómez-Montoya, A., Quintero, O. L., López, N. M. y Castro-Martínez, J. (2016). An Approach to Emotion Recognition in Single-Channel EEG Signals: A Mother Child Interaction. *Journal of Physics: Conference Series*, 705, 1-4. DOI: 10.1088/1742-6596/705/1/012051
- Gómez-Montoya, A., Quintero, O. L., López, N. M. y Castro-Martínez, J. (2017). An Approach to Emotion Recognition in Single-Channel EEG Signals using Discrete Wave-

- let Transform. En *38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33271.83360>
- Hastie, T., Tibshirani, R. y Friedman, J. (2001). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction*. Nueva York: Springer
- López, C. N., Ponce, S., Quintero, O. L. y Vargas-Bonilla, F. (2016). *Improving Quality of Life: Home Care for Chronically Ill and Elderly People Chapter Caregiving and Home Care*. Recuperado de <https://www.intechopen.com/books/caregiving-and-home-care/improving-quality-of-life-home-care-for-chronically-ill-and-elderly-people>
- Mejía, G., Gómez-Montoya, A. y Quintero, O. L. (2016). Reconocimiento de emociones utilizando la transformada wavelet estacionaria en señales EEG multicanal. En *vii Latin American Conference on Biomedical Engineering CLAIB*, Bucaramanga, Colombia.
- Mejía, S., Quintero, O. L. y Castro-Martínez, J. (2015). Dynamic Analysis of Emotions through Artificial Intelligence. *Avances en Psicología Latinoamericana*, 33, 1-30.
- Gómez-Montoya, A., Quintero, O. L., López Pulido, S. (2017). Analysis of Functional Connectivity Networks from Emotional EEG Signals. En *ICAMI 2017: A Memorable Synapsis* (pp. 651-652).
- Restrepo, D. y Gómez-Montoya, A. (2017). *Short Research Advanced Project: Development of Strategies for Automatic Facial Feature Extraction and Emotion Recognition 2017*. IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC).
- Hurtado, L., Quintero, O. L. y García, J. (2014). Estimación del precio de oferta de la energía eléctrica en Colombia mediante inteligencia artificial. *Journal of Quantitative Methods for Economics and Business Administration*, 18, 54-87.
- Karaboga, D. y Kaya, E. (2018). Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) Training Approaches: A Comprehensive Survey. *Artificial Intelligence Review*, 1-31.
- Kim, B. H. y Jo, S. (2018). Deep Physiological Affect Network for the Recognition of Human Emotions. *IEEE Transactions on Affective Computing*. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2018.2790939>
- Linnainmaa, S. (1976). Taylor Expansion of the Accumulated Rounding Error. *BIT Numerical Mathematics*, 16(2), 146-160.
- Masood, Z., Majeed, K., Samar, R. y Raja, M. A. Z. (2017). Design of Mexican Hat Wavelet Neural Networks for Solving Bratu Type Nonlinear Systems. *Neurocomputing*, 221, 1-14.
- Quintero, O. L., Villa, L., Castañeda, L. y Mejía, G. (2015). Fuzzy Inference System for Modelling Failure Modes in a Ropeway for Massive Transportation. *Wit Transac-*

tions on Information and Communication Technologies, 1, 113-136. DOI: <https://doi.org/10.2991/aiie-15.2015.32>

- Quintero, O. L., Villa, L. F., Muñoz, S. y Bastidas, M. (2014). Information Retrieval on Documents Methodology Based on Entropy Filtering Methodologies. *International Journal of Business Intelligence and Data Mining*, 3(3), 281-296. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2015.071327>
- Rakhshandehroo, G., Akbari, H., Afshari Igder, M. y Ostadzadeh, E. (2017). Long-Term Groundwater-Level Forecasting in Shallow and Deep Wells Using Wavelet Neural Networks Trained by an Improved Harmony Search Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(2).
- Rissanen, J. (2010). Minimum Description Length Principle. En *Encyclopedia of Machine Learning* (pp. 666-668). Nueva York: Springer.
- Rudovic, O., Lee, J., Dai, M., Schuller, B. y Picard, R. (2018). Personalized Machine Learning for Robot Perception of Affect and Engagement in Autism Therapy. *Science Robotics*, 3(19).
- Uribe, A., Gómez-Montoya, A., Bastidas, M., Quintero, O. L. y Campo, D. (2017). A Novel Emotion Recognition Technique from Voiced-Speech. *IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*.
- Schmidhuber, J. (2015). Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*, 61, 85-117.
- Sierra-Sosa, D., Bastidas, M., Ortiz, D., Quintero, O. L. (2016). Double Fourier Analysis for Emotion Identification in Voiced Speech. *Journal of Physics: Conference Series*, 705, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/705/1/012035>
- Zadeh, L. (2005). Toward a Generalized Theory of Uncertainty (GTU) — An Outline. *Information Sciences*, 172, 1-40.

Impacto de cambios tecnológicos en el trabajo: una revisión de la evidencia empírica para América Latina

Gloria Lizeth Ochoa-Adame, Aldo Josafat Torres-García

Resumen

El cambio tecnológico aplicado a los procesos productivos contribuye al mejoramiento de técnicas para el desarrollo de nuevos productos, lo cual incrementa la productividad de las empresas y favorece el crecimiento económico de los países. Sin embargo, de acuerdo con evidencia reciente, tras ser introducida en el mercado de trabajo la tecnología produce cambios en su estructura y desigualdad salarial. El objetivo del presente capítulo es hacer una revisión de literatura reciente en relación con el impacto del cambio tecnológico en el mercado laboral en los países de América Latina, y realizar una propuesta metodológica para su medición y para facilitar el levantamiento de datos que hagan los institutos de estadística de los distintos países. Los resultados de la revisión de literatura muestran que una hipótesis planteada para países desarrollados tiene efectos diferentes al ser probada para los países latinoamericanos, sobre todo cuando el cambio tecnológico de dichos países es resultado de un proceso de deslocalización de la mano de obra, así como de dependencia tecnológica que impide el desarrollo de innovación y tecnología propia.

Palabras clave: cambio tecnológico, desigualdad salarial, Latinoamérica, TIC

¿Cómo citar este capítulo? / How to cite this chapter?

Ochoa-Adame, G. L. y Torres-García, A. J. (2019). Impacto de cambios tecnológicos en el trabajo: una revisión de la evidencia empírica para América Latina. En J. A. Navas-Sierra (Ed.), *Tecnologías disruptivas del proceso de globalización* (pp. 215-236). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.16925/9789587601268.9>

Impact of technological changes in the workplace: a review of the empirical evidence for Latin America

Gloria Lizeth Ochoa-Adame, Aldo Josafat Torres-García

Abstract

The technological change applied to the productive processes contributes to the improvement of techniques for the development of new products, which increases the productivity of the companies and favors the economic growth of the countries. However, according to recent evidence, the introduction of technology in the labor market produces changes in its structure and salary inequality. The objective of this chapter is to review recent literature regarding the impact of technological change on the labor market in Latin American countries, and to make a methodological proposal for its measurement and to facilitate the data collection done by the statistics institutes of different countries. The results of this review show that a hypothesis proposed for developed countries has different effects when tested for Latin American countries, especially when the technological change of these countries is the result of a process of relocation of labor and dependency technology, which inhibit innovation and technological development.

Keywords: technological change, wage inequality, Latin America, TIC

Introducción

Uno de los objetivos de la tecnología es perfeccionar la división técnica del trabajo. Por tal motivo, el cambio tecnológico podría definirse como el proceso de incorporación tecnológica que produce modificaciones en la cantidad y la calidad de los productos.

Por su parte, la globalización está estrechamente ligada con la reciente revolución de las telecomunicaciones, ya que estas tecnologías han permitido la comunicación y la transferencia de grandes volúmenes de información entre distintos lugares del mundo en tiempo real. El factor central de esta revolución tecnológica ha sido la computadora y posteriormente Internet, por tanto, se han convertido en unos de los elementos centrales para entender la globalización y los efectos que de ella se desprenden, tales como la intensificación del comercio, la masificación del conocimiento y la tecnificación de los procesos productivos, lo cual en su conjunto adopta la forma de cambio tecnológico.

Desde la perspectiva del empleo, Acemoglu (2002) desarrolló un modelo para analizar si el progreso técnico contribuye al incremento del uso del trabajo o del capital. En ese contexto, se formula la hipótesis de cambio tecnológico sesgado (HCTS) y es según esta hipótesis que se fundamenta el presente capítulo.

El modelo de Acemoglu trata de explicar por qué los salarios de los profesionistas se incrementaron en Estados Unidos desde la década de los noventa. Sus resultados mostraron que dicho aumento se atribuyó a la aparición de nuevas tecnologías que funcionaron como complemento a las habilidades de los trabajadores; de acuerdo con este modelo, cuando aumenta la oferta de trabajadores calificados (con estudios universitarios), el mercado de tecnologías se incrementa también, lo que provoca complementariedad del trabajo con dichas innovaciones tecnológicas.

Bajo este marco teórico en el que se toma el uso de equipo de cómputo como una aproximación de la tecnología en el trabajo¹, el presente capítulo tiene el siguiente orden: en el primer apartado, se hace una revisión de la literatura en relación con la HCTS, el modelo de Acemoglu (2002) y sus principales supuestos; en la segunda sección, se muestra la evidencia empírica para países desarrollados; el tercer bloque hace referencia a la evidencia empírica para América Latina. Finalmente, en el último apartado se explican los retos de la medición del cambio tecnológico y se realiza una propuesta pertinente según los retos planteados, sujeta a la disponibilidad de los datos en los distintos países, lo cual servirá como una recomendación para los organismos e institutos encargados del levantamiento de datos estadísticos sobre esta materia en América Latina.

Entre los principales hallazgos de este capítulo se encuentra la evidencia de que el impacto del cambio tecnológico en el mercado de trabajo ha sido poco explorado: primero porque la propuesta metodológica de la HCTS es aplicable para países desarrollados cuya producción tecnológica es propia y segundo, por la dificultad en su medición.

La principal contribución gira en torno a una propuesta en la medición del impacto del cambio tecnológico en el mercado laboral y a una recomendación en términos del levantamiento de los datos para los distintos países.

Revisión de la hipótesis del cambio tecnológico sesgado (HCTS)

A finales de los años ochenta, se observaron modificaciones en la estructura ocupacional y salarial en diversos países desarrollados, y debido a esto surgieron varias investigaciones para tratar de encontrar respuesta al fenómeno observado. Después de años de investigación sobre el tema, se concluyó que el origen de dichos cambios se debía a la propagación de equipo de cómputo en los centros de trabajo.

El trabajo de Acemoglu (2002) es una de las investigaciones que explican con más claridad cómo la tecnología (y aquellos empleados que tienen el conocimiento específico para su uso) sustituye a los trabajadores con menos habilidades. El modelo desarrollado explica los cambios en los salarios de los graduados universitarios que se incrementaron significativamente en las últimas décadas en Estados Unidos. De acuerdo con el autor, dichos cambios se atribuyen a la propagación

1 Se considera una aproximación de tecnología al equipo de cómputo, ya que a partir de la década de 1970 se propagó su uso en los puestos de trabajo en Estados Unidos. Los autores mencionados en todo este documento abordan de igual forma el estudio del cambio tecnológico en el mercado laboral.

de nuevas tecnologías en los puestos de trabajo y a su complementariedad con las habilidades de los trabajadores.

El modelo analiza dos tipos de trabajadores: calificados (con grado universitario) y no calificados (sin grado universitario); ambos pueden realizar tareas distintas en sus puestos de trabajo y su calificación está medida por los grados de escolaridad que tienen. Los trabajadores son sustitutos imperfectos en el proceso productivo, y la elasticidad de sustitución entre estos dos tipos de trabajo es central para comprender los cambios en el premio a la habilidad.

Se supone que la oferta total de trabajadores no calificados está representada por L y la oferta total de mano de obra calificada está representada por H .

La función de producción de la economía agregada toma la siguiente forma de elasticidad de sustitución:

$$Y = [(A_L L)^{\sigma-1/\sigma} + (A_H H)^{\sigma-1/\sigma}]^{\sigma/\sigma-1} \quad (1)$$

Donde $\sigma \in [0, \infty]$ es la elasticidad de sustitución entre trabajo calificado y no calificado, y A_L y A_H son los factores que utilizan tecnología.

La elasticidad permite interpretar el efecto del cambio tecnológico en este modelo. Su estimación se refiere a que los trabajadores calificados y no calificados son sustituidos cuando la elasticidad de sustitución es $\sigma > 1$, y son complementarios cuando $\sigma < 1$.

Tres casos especiales se dan:

1. $\sigma \rightarrow 0$, cuando trabajadores calificados y no calificados solo pueden producir en proporciones fijas.
2. $\sigma \rightarrow \infty$, cuando ambos tipos de trabajo son perfectamente sustitutos (y por lo tanto solo hay una habilidad que H y L poseen en diferentes cantidades).
3. $\sigma \rightarrow 1$, cuando la función de producción es de la forma Cobb-Douglas.

En este marco de análisis, las tecnologías son el factor de aumento, lo que significa que el cambio tecnológico sirve para incrementar la productividad de los trabajadores calificados o los no calificados. Esto depende del valor de la elasticidad de sustitución; sin embargo, un aumento en A_H o A_L puede actuar ya sea para complementar o sustituir trabajadores.

La función de producción (ecuación 1) admite tres interpretaciones diferentes:

1. Los trabajadores calificados y no calificados son sustitutos imperfectos de la producción de este bien.

2. La función de producción es equivalente a una economía definida por dos productos.
3. Una mezcla de las dos anteriores, por lo cual diferentes sectores producen bienes que son sustitutos imperfectos, y los trabajadores de alta y de baja educación se emplean en ambos sectores.

Dado que los mercados laborales son competitivos, el bajo salario determinado por habilidades se da simplemente por el valor del producto marginal del trabajo de habilidad baja, que se obtiene mediante la diferenciación (2) como sigue:

$$\omega L = \frac{\partial Y}{\partial X} = A_L^{\sigma-1/\sigma} \left[A_L^{\sigma-1/\sigma} + A_H^{\sigma-1/\sigma} (H/L)^{\sigma-1/\sigma} \right] 1/\sigma - 1 \quad (2)$$

La ecuación (2) tiene las siguientes implicaciones importantes:

1. $\frac{\partial \omega_L}{\partial H} > 0$, es decir, cuando la fracción de trabajadores de alta calificación aumenta, baja su salario. Esto es una consecuencia de la sustitución imperfecta entre trabajadores de alta y de baja calificación. Un aumento en la oferta relativa de los trabajadores de alta calificación aumenta la demanda por los servicios de los trabajadores poco calificados, al elevar su salario en una unidad (formalmente, los trabajadores calificados y no calificados son complementarios).
2. $\frac{\partial \omega_L}{\partial A_L} > 0$ y $\frac{\partial \omega_L}{\partial A_H} > 0$, esto es que el cambio técnico es un factor que provoca el aumento del salario de los trabajadores poco calificados, con excepción de los casos donde la elasticidad de sustitución es cero o tiende a infinito.

Mejoras tecnológicas de cualquier tipo darán lugar a salarios más altos para los dos grupos de habilidades. Así, a menos que exista un retroceso técnico, el modelo no podría explicar la disminución de los salarios.

Del mismo modo, el salario del trabajo calificado es:

$$\omega_H = \frac{\partial Y}{\partial H} = A_H^{\sigma-1/\sigma} \left[A_L^{\sigma-1/\sigma} (H/L)^{-\sigma-1/\sigma} + A_H^{\sigma-1/\sigma} \right] 1/\sigma - 1 \quad (3)$$

Nuevamente, se dice que $\frac{\partial \omega_H}{\partial L} < 0$, por lo tanto cuando la cantidad de trabajo calificado es más abundante, sus salarios tienden a caer. Segundo, $\frac{\partial \omega_H}{\partial A_L} > 0$ y $\frac{\partial \omega_H}{\partial A_H} > 0$, entonces el cambio tecnológico en algunos tipos de habilidades incrementa el salario.

Al combinar la ecuación (2) y la (3), el rendimiento de la educación del salario del trabajo calificado es dividido por el salario del trabajo no calificado.

$$w = \frac{\omega_H}{\omega_L} = \left(\frac{A_H}{A_L} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \left(\frac{H}{L} \right)^{\frac{-1}{\sigma}} \quad (4)$$

La ecuación (5) muestra que existe una simple relación lineal logarítmica entre el rendimiento de la educación y la oferta relativa de las habilidades medidas por H/L . De manera equivalente, la ecuación (5) implica:

$$\ln W = \frac{\sigma-1}{\sigma} \ln \left(\frac{A_H}{A_L} \right) - \frac{1}{\sigma} \ln \left(\frac{H}{L} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \ln_w}{\partial \ln H/L} = -\frac{1}{\sigma} < 0 \quad (6)$$

Para un sesgo de destreza en particular de la tecnología, capturada aquí por AH/AL , un aumento en la oferta relativa de habilidades reduce el rendimiento de la educación con una elasticidad de $\frac{1}{\sigma}$. Intuitivamente, un aumento en H/L crea dos tipos diferentes de sustitución.

En primer lugar, si los trabajadores de alta y de baja calificación producen distintos bienes, el incremento de los trabajadores de alta calificación aumentará la producción, dando lugar a una mayor demanda de este tipo de trabajo. Esta sustitución hace daño a los ingresos relativos de los trabajadores de alta calificación, dado que reduce la utilidad marginal del consumo y por lo tanto, el precio real.

En segundo lugar, cuando los trabajadores de alta y de baja calificación producen el mismo bien, pero realizan diferentes funciones, un aumento en el número de trabajadores de alta calificación requerirá una sustitución de trabajadores de alta calificación para las funciones realizadas antes por los trabajadores de baja calificación.

Más formalmente, al diferenciar la ecuación (5) con respecto a los rendimientos de AH/AL , se obtiene:

$$\frac{\partial \ln_w}{\partial \ln \left(\frac{A_H}{A_L} \right)} = \frac{\sigma-1}{\sigma} \quad (7)$$

La ecuación (7) implica que si la elasticidad es > 1 , entonces las mejoras relativas en el aumento de habilidad tecnológica (es decir, en el AH/AL) incrementan el rendimiento de la educación. Esto puede ser visto como un desplazamiento de la curva de demanda relativa de habilidades. Sucede lo contrario cuando la elasticidad es < 1 , es decir que cuando se produce una mejora en la productividad de los trabajadores más educados en relación con la productividad de los trabajadores menos calificados, sucede que la curva de demanda se desplaza y provoca una reducción del rendimiento de la educación.

Por lo tanto, se considera el cambio tecnológico como el factor de aumento de los salarios. En este caso, a medida que aumenta AH , los trabajadores de alta

calificación son más productivos y por lo tanto la demanda de trabajadores de baja calificación se incrementa en más de la demanda de trabajadores de alta calificación. En efecto, el aumento de la AH crea un exceso de oferta de trabajadores de alta calificación, de modo que provoca una disminución del salario relativo de los más calificados.

Con la aplicación de este modelo para Estados Unidos, se ha demostrado que el aumento de la oferta de universitarios ha generado un cambio endógeno acelerando el cambio tecnológico sesgado en favor de mayores grados de escolaridad o de los trabajadores más calificados. Además, se ha mostrado que este fenómeno es más recurrente en países desarrollados, precisamente por la tecnología que se produce en dichas naciones.

Una vez mostrado el modelo de sustitución, podemos observar cómo ciertos elementos son aplicables únicamente a países desarrollados. En este sentido, resulta muy importante analizar la situación y las características reales de los países en desarrollo para que las investigaciones realizadas sobre el tema puedan tener conclusiones coherentes con las economías de dichas naciones.

Evidencia para países desarrollados

Debido a que el desarrollo de la tecnología informática, propia de los países desarrollados, se propagó inicialmente en estas economías, los primeros estudios sobre el cambio tecnológico y su relación con la desigualdad salarial fueron realizados en naciones donde las actividades productivas habían empezado una etapa de reconversión tecnológica producto de la incorporación de equipo de cómputo en los procesos productivos.

En este conjunto de investigaciones desencadenadas a partir del cambio tecnológico propiciado por la llamada revolución informática de principios de los años ochenta, destacan los trabajos pioneros de Junh *et al.* (1993), Katz y Murphy (1992), Krueger (1993), Baldwin y Cain (1997), Autor, Katz y Krueger (1998) y Acemoglu (2002), entre otros. En estas investigaciones, se documentó y evidenció la HCTS, principalmente para Estados Unidos y Reino Unido.

La premisa que se mantenía dentro de este cuerpo de literatura era que el cambio tecnológico inducido por el uso de computadoras modificaba la estructura salarial y ocupacional del mercado laboral, con lo que se incrementaba la demanda de trabajo calificado en detrimento del no calificado. De la misma manera, se asumía el desigual comportamiento de los salarios como una consecuencia de este cambio técnico.

A continuación, se presenta una revisión de trabajos empíricos en los cuales se exhiben diversas implicaciones provocadas por el cambio tecnológico en el mercado laboral internacional, con el objetivo de mostrar la evidencia para países desarrollados y en la siguiente sección se hace lo propio para América Latina.

Las posibles explicaciones de las tendencias crecientes en la desigualdad salarial de la década de 1980 iniciaron pocos años después, mostrando como posible causa de la desigualdad el cambio técnico inducido por la incorporación de tecnología informática en los procesos productivos y administrativos en las firmas. Uno de los primeros documentos de esta línea de investigación es el de Davis y Haltiwanger (1991), quienes analizan la dispersión salarial entre e intrafábricas manufactureras estadounidenses para el periodo 1963-1986. Este artículo analiza y propone que el incremento de la desigualdad salarial puede deberse a cuatro posibles factores: i) cambios en la demanda de trabajo generada por el cambio tecnológico sesgado, ii) cambios en la demanda laboral debido a la competencia en bienes producidos por trabajadores menos calificados, iii) cambios en las normas sociales, y iv) debilitamiento del sindicalismo.

Bailey (1990) detectó y documentó los cambios en la economía y la fuerza de trabajo de Estados Unidos de aquella época. Entre estos cambios destaca un proceso de sobreeducación en la población, lo cual ocasionó que los empleadores eligieran entre los altamente educados, aun cuando el trabajo podría haber sido desempeñado por trabajadores menos calificados. Después, los empleadores ya no estuvieron dispuestos a pagar mucho más por los graduados universitarios. Evidencia de esto la presenta Freeman (1976), quien mostró que el incremento salarial de los graduados universitarios, en comparación con el ingreso de los que no superaban la educación básica, cayó drásticamente durante la década de 1970.

Así mismo, Bailey (1990) menciona el concepto de cambio tecnológico o tecnología moderna para referirse a la maquinaria y al equipo que modifican los procesos productivos, haciéndolos más sencillos de manipular. Esto, de acuerdo con el autor, genera dos grupos de trabajadores: i) los que utilizan esta tecnología de forma casi intuitiva, simplificando la operación; y ii) los creadores de estas nuevas tecnologías. Bajo este marco de referencia, el autor considera que no es necesaria una alta calificación del usuario de la tecnología, y que la habilidad de solución de problemas o programación de la maquinaria está restringida a unos cuantos altamente calificados². A este proceso se le conoció en aquel momento

2 Bailey (1990) menciona la transformación tecnológica de los restaurantes de comida rápida durante la década de 1980, donde las complejas máquinas registradoras fueron sustituidas por máquinas con íconos y dibujos del menú, permitiendo que este trabajo sea realizado, incluso, por individuos que no reconocen los números ni las letras.

como descalificador (*deskilling*), puesto que la introducción de nueva tecnología en la economía restaba capacidad analítica al operador, posibilitando que las tareas fueran realizadas por personal menos calificado.

Complementando esta visión, algunos autores señalan que los usuarios de equipo de cómputo tienen mayor posibilidad de incrementar la productividad laboral, así como de utilizar la nueva tecnología como un elemento catalizador de innovaciones, lo cual los remite a una mayor probabilidad de ser empleados en empresas que están modificando sus procesos productivos acordes a la nueva tecnología.

Gottschalk y Joyce (1991) aseguran que la creciente desigualdad salarial registrada durante la década de 1980 en Estados Unidos —y por lo tanto, las características de la oferta laboral³— no fue exclusiva de este país, sino que también se manifestó en gran cantidad de países desarrollados. Este estudio considera a las siguientes naciones: Australia, Canadá, Francia, Alemania, Holanda, Suecia, Reino Unido y Estados Unidos.

En línea con el documento mencionado, Berman, Bound y Machin (1998) afirman que el cambio tecnológico sesgado documentado en Estados Unidos en la década de 1980 se propagó a todo el mundo desarrollado. Se menciona que el factor que favoreció la demanda por trabajadores calificados en detrimento de los no calificados durante esa década en la manufactura tuvo como causa principal el cambio tecnológico ahorrador de trabajo. Esta afirmación es sustentada empíricamente por los autores al encontrar una estrecha relación entre la demanda de trabajo calificado y la inversión en equipo de cómputo, así como en actividades de investigación y desarrollo.

En Estados Unidos, Katz y Murphy (1992) encuentran que los salarios relativos y el número de trabajadores más educados, así como la participación de las mujeres en el mercado laboral, aumentaron sustancialmente desde 1963 hasta 1987, trayendo consigo el drástico incremento de la desigualdad salarial. Estos autores destacan el planteamiento de Krueger (1993), quien asevera que el uso de la computadora en el trabajo es el elemento clave en la determinación de la estructura de la demanda laboral.

Al respecto, Krueger (1993) examinó por primera vez si los trabajadores usuarios de computadoras en el lugar de trabajo reciben un mayor salario que aquellos

3 Las características referidas corresponden al incremento de graduados universitarios, el deterioro del ingreso de los trabajadores menos calificados, el incremento del comercio internacional, así como al proceso de terciarización de la economía, aunada al proceso de desigualdad salarial.

no usuarios. En el documento, se concluye que los trabajadores que usan equipo de cómputo en el trabajo reciben un salario 10-15 % mayor que quienes no ocupan esta tecnología. El autor señala que para el periodo 1984-1989 las ocupaciones que experimentaron un incremento salarial por encima de la media fueron aquellas que tuvieron el mayor crecimiento en el uso de equipo de cómputo.

De esta forma, la literatura comenzó a buscar nuevas formas de acercarse a una medición más precisa del cambio tecnológico e incluso a redefinir el concepto de cambio técnico, toda vez que el conjunto tecnológico adaptable al trabajo ha sido creciente, se ha ido transformando y ha incorporado nuevos dispositivos y elementos a este paradigma.

Al respecto, DiNardo y Pischke (1997) consideraron a las computadoras como herramienta auxiliar en la ejecución de determinadas tareas que aumentan la productividad de los trabajadores y, por tanto, su uso se refleja en una prima salarial para quienes tienen habilidades computacionales. Estos autores cuestionaron los resultados de Krueger (1993), sugiriendo que la magnitud de las diferencias salariales del uso de computadoras es similar al uso de algunas herramientas de oficina (calculadora, teléfono, bolígrafo/lápiz, etc.).

Dos elementos deben considerarse ante el escenario planteado en este par de documentos: i) la investigación de Krueger (1993) fue realizada para Estados Unidos, mientras que la de DiNardo y Pischke (1997) hace referencia a Alemania, donde el conjunto de datos es más amplio y detallado; además, ii) pueden existir destrezas no observadas que se relacionen mínimamente con el uso de computadoras, pero que son ampliamente valoradas por el mercado laboral⁴.

Años después, Dunne *et al.* (2004) indagan sobre el origen de los cambios en la estructura productiva, salarial y ocupacional estadounidense generada durante las últimas décadas. A través de datos de establecimientos, encuentran que la adopción de tecnología diferenciada (o sesgada) a través de las empresas es la principal causa del incremento en la dispersión en los salarios y en la productividad, y que esta conversión tecnológica se debe a los cambios en la distribución de la inversión en computadoras a través de las distintas unidades económicas.

En un estudio más reciente, Michaels, Natraj y Van Reenen (2010) aseguran que las TIC tienen importantes implicaciones en las transformaciones recientes del mercado laboral. Afirman que las nuevas tecnologías son complementarias a las tareas analíticas, generalmente realizadas por trabajadores con educación superior,

4 Para solventar estos detalles, la literatura posterior ha sugerido mejorar el levantamiento de datos en términos de la muestra y los cuestionamientos, así como refinar las técnicas econométricas de estimación para captar mejor el efecto del uso de computadoras en el salario.

y que al mismo tiempo sustituyen tareas rutinarias, realizadas por trabajadores con educación media, y tienen un efecto muy ligero en actividades manuales no rutinarias⁵, generalmente realizadas por trabajadores con bajo nivel educativo.

Empíricamente, el mencionado documento usa datos a nivel de la industria para Estados Unidos, Japón y otros nueve países de Europa en el periodo 1980-2004. Los resultados muestran una polarización atribuible a la tecnología informática; además, señalan que las industrias con mayor adopción de estas nuevas tecnologías fueron las que tuvieron también los mayores incrementos en la demanda relativa de trabajadores de alto nivel educativo, así como disminuciones considerables en la demanda relativa de trabajadores con educación intermedia.

En el mencionado estudio, se señala que la polarización en el mercado laboral se manifiesta en la distribución de los niveles salariales, ya que resultan más afectados los trabajadores de salarios medios⁶ y en menor medida se afectan los trabajadores de la parte inferior, mientras que los de la parte superior mejoran. Los autores atribuyen este resultado a los efectos de sustitución y complementariedad de las TIC sobre los trabajadores con mediana y alta escolaridad, así como al poco efecto sobre los de menor escolaridad.

La evidencia demostró un incremento de la demanda de trabajo calificado en Estados Unidos, con una elasticidad de sustitución de trabajo calificado por no calificado que pasó de 1,44 en 1990 a 1,60 en el 2010 (Acemoglu y Autor, 2011). Berman, Bound y Griliches (1993) y Acemoglu (2002) señalan que el cambio tecnológico se explica por la variación en las habilidades de los trabajadores; desde esta perspectiva, realizan diferentes aplicaciones econométricas para comprobar esta hipótesis, cuyos resultados muestran que es el cambio tecnológico el que produce una diferencia salarial entre países pobres y ricos.

En otro de los estudios realizados por Acemoglu y Autor (2011) para el caso de Estados Unidos, entre las principales características del mercado laboral de dicho país destacaron un crecimiento de las ocupaciones gerenciales y técnicas, y una reducción en las profesiones de producción y operativas. Esta reducción se presentó casi en veinte puntos porcentuales en el periodo 1959-1979.

Por lo tanto, la polarización del empleo durante este periodo en Estados Unidos se explica con base en los siguientes factores:

5 Ejemplo de estas, de acuerdo con el autor, son: limpieza, jardinería, cuidado de niños, etc.

6 Consideran, entre otros, a empleados bancarios y asistentes legales.

1. El aumento del empleo en ocupaciones rutinarias no cognitivas⁷.
2. El aumento del empleo en ocupaciones no rutinarias.
3. La disminución del empleo en personas de mediana habilidad.

Como se puede observar, existe evidencia consistente sobre las modificaciones que se han producido en el mercado laboral después de la incorporación de tecnología, principalmente equipo de cómputo. Desde diversas perspectivas e intentando hacer demostraciones en diferentes sectores, los autores concluyen que si bien la tecnología es un factor de aumento de la productividad, también incrementa las disparidades salariales y reduce la demanda de aquellos individuos que no cuentan con habilidades específicas para su uso y apropiación.

Evidencia para América Latina

A pesar de que se ha documentado ampliamente la existencia de desigualdad salarial asociada a la tecnología en distintos mercados laborales, este hecho ha sido demostrado mayoritariamente para países desarrollados, mientras que en el caso de los países en vías de desarrollo los trabajos afines son escasos (Oosterbeek y Ponce, 2011; Liu, Tsou y Hammitt, 2004; Ng, 2006; Félix-Verduzco y Torres-García, 2018). De tal modo, se desconoce si las implicaciones del cambio tecnológico son iguales o ampliamente diferenciables en este último tipo de países.

Para el caso de México, se han desarrollado diversos estudios con el objetivo de demostrar si el cambio tecnológico ha producido modificaciones en el mercado laboral, y particularmente en la estructura salarial se ha observado que el impacto es diferenciado regionalmente y que los salarios, aun cuando benefician el trabajo calificado, han tenido una caída, lo cual ha contribuido a reducir la desigualdad salarial.

Entre dichos estudios destacan el de Rodríguez y Castro (2012), quienes analizan el impacto del cambio tecnológico en los mercados de trabajo regionales de México y realizan estimaciones de la ecuación salarial de Mincer. Sus principales resultados muestran que existe un premio salarial para aquellos trabajadores que se desempeñan en áreas de alta tecnología, dicho premio favorece en mayor medida a los trabajadores de la frontera norte del país.

Por su parte, Camberos, Huesca y Castro (2013) desarrollan una aplicación de panel de datos para el sector de servicios, con el fin de determinar las diferencias

7 Las ocupaciones rutinarias no cognitivas son aquellas que no requieren de un elevado grado de escolaridad y estas pueden ser sustituidas por máquinas.

salariales en las regiones de México entre trabajadores calificados y no calificados. Sus principales resultados muestran que el salario favorece a la región capital y al trabajo de mayor requerimiento educativo.

Huesca y Ochoa (2016) analizan la desigualdad salarial como resultado del impacto del cambio tecnológico en el mercado laboral de la frontera norte de México. Los autores demuestran que la disparidad en los salarios disminuyó del 2005 al 2012, y que el tipo de empleo que más influye en dicha disparidad es el no calificado que se desarrolla en el sector informal.

En otro de los estudios realizados por Calderón, Ochoa y Huesca (2017), analizan la sustitución de trabajo calificado por no calificado en el sector manufacturero de México. Mediante un análisis de panel de datos, encuentran que no existe sustitución en favor de los trabajadores calificados, debido a que los procesos productivos de dicho sector requieren de tecnología que simplifique las técnicas de trabajo; por tal motivo, la demanda de trabajadores no calificados es mayor.

En lo que respecta a Torres y Félix (2017), utilizan información del Módulo sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de Información (MODUTi) y mediante una fusión con la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE) logran por primera vez en México obtener información sobre uso de computadoras y datos de empleo para el 2012, lo que les permite medir el rendimiento al salario para los usuarios de equipo de cómputo en el trabajo por sector de actividad. Sus principales resultados muestran que existe un premio que favorece a los usuarios de computadoras en el trabajo en el sector de la construcción y manufactura.

Torres y Félix (2017), utilizando la fusión de bases de datos antes mencionada, estiman ecuaciones salariales con efectos mixtos y técnicas de emparejamiento; sus hallazgos para el 2006 y el 2014 muestran que existe un premio de 17-19% para usuarios de equipo de cómputo, lo que sugiere un impacto positivo del cambio tecnológico en los salarios de los usuarios de dicha tecnología.

Finalmente, Torres y Ochoa (2018) miden el premio al uso de tecnología de la información y la comunicación en el trabajo por ocupaciones para México en el año 2014, cuyos resultados muestran que existe un rendimiento al salario que favorece las ocupaciones con menores requerimientos de mano de obra calificada.

Para el caso de Colombia, uno de los trabajos pioneros en el tema es el de Arango, Posadas y Uribe (2005), quienes hicieron un estudio de la estructura salarial en el país y demostraron haber observado un aumento en los salarios que favoreció a los empleados con mayores niveles de educación, esto como consecuencia de la incorporación de equipo de cómputo en el trabajo.

Oosterbeek y Ponce (2011) señalan la escasez de trabajos sobre esta línea para países en vías de desarrollo, y aportan a la literatura el análisis del impacto de las computadoras en el ingreso laboral de Ecuador, encontrando una prima salarial al uso de equipo de cómputo en el trabajo por un 10%.

En cuanto a Chile, Benavente, Bravo y Montero (2011) usan técnicas de emparejamiento para estimar el premio al uso de equipo de cómputo en el trabajo durante el periodo 2000-2006. Sus resultados muestran que hubo un rendimiento del 26% en año 2000, que disminuyó a 16% en el 2006. Los autores concluyen que la prima asociada al uso de computadoras se puede ver como un incremento en la productividad debido a la inclusión de un nuevo factor productivo, en este caso el equipo de cómputo.

Para Uruguay, Rodríguez López (2014) analiza el impacto de las tareas con contenido tecnológico en los cambios en la distribución salarial de los hombres, para lo cual realiza regresiones cuantílicas no condicionadas y encuentra que la tecnología es la principal causante de la desigualdad salarial en dicho país, lo que está en línea con la HCTS revisada en este capítulo. Cabe destacar que el estudio se realiza para finales de los años noventa y principios de los dos mil, por lo tanto la autora menciona que la desigualdad ha sufrido modificaciones interesantes a lo largo del periodo y deja abierta la posibilidad de revisar otras causas al respecto.

Entre los estudios que se destacan para países de América Latina de forma agregada está el de Manacorda, Sánchez-Páramo y Schady (2005), quienes analizan los salarios relativos de trabajadores con distintos niveles de educación en cinco países de América Latina, con el objetivo de determinar si existe una mayor demanda de empleo calificado derivado del cambio tecnológico. Los autores encuentran que se presentó una reducción de los salarios de los trabajadores con educación secundaria y una mayor demanda de trabajadores calificados con datos de 1987 a 1999.

Otro de los estudios es el de Navarro (2010), quien mediante técnicas de emparejamiento analiza el impacto del uso de Internet en los salarios en Brasil, Chile, Costa Rica, Honduras, México y Paraguay. Sus principales resultados muestran que el premio al uso de Internet es mayor que en países desarrollados; debido a que la cobertura es menor en la región, sugieren realizar análisis de panel de datos para capturar mejor el efecto.

Como se vio en este apartado, los estudios para los países latinoamericanos han mostrado que existe un premio al salario por el uso de computadora e Internet en el trabajo. Sin embargo, se ha observado una reducción de la desigualdad salarial, así como una mayor demanda de mano de obra no calificada, lo cual se

explica con el cambio tecnológico exógeno y el tipo de procesos productivos en los que se introduce; tal es el caso del sector servicios.

Debido a lo mostrado aquí, en el siguiente apartado se abordan los retos de la medición del cambio tecnológico en los países de América Latina, pues se considera que el tema no está agotado y se requiere de un mayor grado de análisis para comprender el fenómeno.

Los retos de la medición del cambio tecnológico

Entre los hallazgos de este capítulo está la evidencia de que el impacto del cambio tecnológico en el mercado de trabajo ha sido poco explorado en los países latinoamericanos: primero, porque la propuesta metodológica de la HCTS es aplicable para países desarrollados cuya producción tecnológica es propia; y segundo, debido a la dificultad en su medición.

En este sentido, la sección discute sobre las diferencias de la HCTS entre países desarrollados y los de América Latina, de acuerdo con los resultados encontrados en la literatura empírica; después, se comenta sobre el reto que representa dimensionar los efectos del cambio tecnológico, desde su propia acepción y hasta la disponibilidad de los datos; por último, se establece una propuesta acerca del levantamiento de encuestas nacionales con las cuales se consideren variables clave para el estudio del cambio tecnológico.

Respecto al primer punto, podemos decir que debido a las diferencias estructurales que existen en países en desarrollo se ha demostrado que los elementos de la HCTS en dichos países no resultan igual que lo evidenciado en las naciones desarrolladas; ejemplo de esto es que de acuerdo con la hipótesis se observaría un incremento en la desigualdad salarial, caso contrario es lo que ha sucedido en México, Chile y Uruguay, donde en años recientes se observó una reducción en las disparidades salariales.

Cabe destacar que la producción de tecnologías en las naciones desarrolladas es propia, por lo tanto su incorporación a los procesos productivos es más veloz que lo que pasa en los países en desarrollo, donde existe un proceso de importación, adaptación y apropiación de las tecnologías.

Y en cuanto al segundo punto, en términos generales sigue existiendo escasez de investigaciones referentes al tema en Latinoamérica, sobre todo documentos que aborden de manera individual a cada país y traten de explicar la realidad del empleo y la tecnología en el contexto del mercado laboral local. Para esto, nuestra consideración sobre estas investigaciones radica en el uso de microdatos, puesto que las modernas técnicas econométricas y la creciente capacidad de procesa-

miento del equipo de cómputo permiten la manipulación de grandes cantidades de datos, con un gran poder explicativo, lo cual proporcionaría un panorama más completo y detallado del fenómeno para América Latina.

En este mismo punto, la reflexión nos lleva a contemplar y a apelar por la creatividad e innovación de los investigadores al momento de establecer la medición de los efectos del cambio tecnológico. Esto es, las distintas formas que caracterizan a la tecnología en cada país, en cada sector de actividad, en función de la disponibilidad de los datos. Por ejemplo, el conjunto tecnológico adaptable al trabajo ha sido creciente e incorpora cada vez mayores equipos y dispositivos con capacidad de almacenamiento y procesamiento superiores cada generación. Esto, sin duda, está y continuará transformando los mercados laborales latinoamericanos.

Finalmente, a través de la revisión de literatura de casos empíricos del cambio tecnológico y sus implicaciones en el trabajo, estamos en condiciones de establecer una propuesta de levantamiento de datos para el caso de las encuestas nacionales en países desarrollados y de América Latina.

Al respecto, se deben retomar los dos principales enfoques referentes al análisis del impacto del cambio tecnológico: uno que refiere al efecto de la tecnología en el desempeño económico de las firmas y otro que trata sobre la asociación positiva entre los usuarios de las nuevas tecnologías y su salario.

Sobre el primer enfoque, hemos detectado que es necesario, en la mayoría de los países latinoamericanos, hacer levantamientos de encuestas más frecuentes que capten la información referente a variables sobre el acervo tecnológico de las empresas, su uso, la distribución en la unidad económica, la antigüedad de la tecnología y la depreciación de esta. Es decir, se requiere mayor detalle sobre el tipo de maquinaria, equipo, instrumentos y dispositivos que tienen y están adquiriendo las firmas, y para qué se están utilizando, lo cual está estrechamente ligado con las áreas o departamentos que requieren y se apropian de dicha tecnología. El monto de la inversión en tecnología es una variable clave para determinar si efectivamente hay un impacto en las variables de desempeño económico de las empresas, así como la antigüedad y depreciación de los equipos, dado que esto nos amplía las posibilidades de considerar la obsolescencia de la tecnología y sus respectivos tiempos y costos de renovación.

En cuanto a las variables de desempeño económico, es fundamental recoger los datos de ventas, valor agregado, remuneraciones, así como los del personal ocupado, desglosando por tipo de actividad, jerarquía, sexo, antigüedad y escolaridad. De esta manera, también se podrá verificar el efecto del cambio técnico diferenciado no solo entre las empresas, sino también en su interior.

Sobre el segundo enfoque, referente al impacto de la tecnología en los ingresos individuales, es necesario que las encuestas nacionales en hogares consideren para una misma base de datos la información sobre características sociodemográficas de la población como: edad, sexo, escolaridad, lugar/región de residencia, estado civil, tipo de educación (pública o privada), presencia (ausencia) de algún tipo de discapacidad; así como datos laborales: condición de ocupación, posición en la ocupación, experiencia laboral, sector de actividad, tipo de jornada laboral, sindicato, tipo de contrato y salario mensual.

De igual forma, es de suma importancia un tercer bloque de datos que recopile la información sobre las habilidades tecnológicas de los individuos, por ejemplo: uso de computadora, experiencia en el uso, frecuencia en el uso, principales programas y actividades en el equipo de cómputo, y si estas son utilizadas en su trabajo y de qué forma. Así mismo, se tendrían que establecer estos lineamientos para otros dispositivos y tecnologías como Internet, tabletas, *smartphones*, etc., a fin de incluso llegar a establecer una diferenciación entre el tipo de tecnología y su aplicación en distintos procesos⁸. De este modo, una de las principales líneas de investigación escasamente exploradas en América Latina, sobre el uso de tecnología informática y su premio al uso, podría tener cabida y continuidad.

Lo anterior permitirá seguir registrando e investigando los efectos del cambio tecnológico en los mercados de trabajo latinoamericanos, por lo cual es cuestión de incluir las variables determinantes en la medición del cambio técnico y de darle continuidad al levantamiento de estas encuestas. También, es debido revisar periódicamente el contenido tecnológico que se va incorporando en el trabajo en las distintas etapas de la cadena de valor, ya sea para producción, control de inventarios, contabilidad, venta, logística/distribución, cartera de clientes, servicios de posventa y lo concerniente a recursos humanos y administración en general⁹. Esto no debe dejar de lado la consideración del sector de actividad para el cual se recabe la información, ya que por ejemplo las actividades de las empresas del sector servicios descansan prácticamente en su totalidad en el uso de tecnología.

8 La aclaración es pertinente toda vez que las tecnologías pueden ser ampliamente diferenciables entre sí; es decir, existen diferencias en las habilidades necesarias para el manejo de un robot, un brazo mecánico, una máquina de control numérico o un controlador lógico programable (PLC), de las que pueden necesitarse para el uso de una computadora, Internet, *software* de administración, estadística y contabilidad. Estas habilidades guardan estrecha relación con la ocupación, el sector de actividad y el grado de conversión tecnológica de las firmas.

9 Incluso la tecnología también ha incidido en otras áreas de las unidades productivas, tal es el caso de la seguridad industrial y la ergonomía, así como distintos mecanismos de control en áreas y departamentos que ahora son responsabilidad de las oficinas de TI o de sistemas.

A pesar de que los organismos internacionales que monitorean los avances en la llamada sociedad del conocimiento han puesto énfasis en la necesidad de establecer metodologías claras y eficientes en el levantamiento de datos sobre tecnología en América Latina, la realidad es que no llega a ser abundante el cuerpo de literatura acerca de los impactos del cambio tecnológico en el trabajo latinoamericano, en gran medida debido a la dificultad en términos de la disponibilidad de datos recientes y acordes con lo que el estudio de esta temática demanda.

Conclusiones

El estudio del cambio tecnológico toma relevancia a partir del inicio de la revolución industrial, periodo en el que las nuevas tecnologías provocaron cambios económicos y sociales. Si bien la introducción de diversos procesos tecnológicos a lo largo de la historia ha provocado modificaciones en la producción, fue durante la primera mitad del siglo XVIII que dichos cambios fueron determinantes en el proceso histórico que seguiría la economía mundial.

En este sentido, el cambio tecnológico se explica como la base central de los cambios económicos y sociales que se han presentado a lo largo de la historia, pero que toman un papel protagónico bajo el modelo económico reciente, en el que el incremento de la competitividad resulta ser el eje central de las organizaciones.

A partir del proceso de apertura comercial, la propagación de tecnología influyó en el restablecimiento de relaciones comerciales, en el surgimiento de nuevos procesos de integración comercial, así como en el incremento de flujos mundiales de redes de información y conocimientos. Sin embargo, dichos procesos trajeron consigo una serie de problemas como incremento de la desigualdad, problemas ambientales y recientemente crisis a nivel mundial.

Con la introducción de tecnología en los procesos de producción, la demanda de mano de obra calificada se incrementó, dado que se requiere que los trabajadores cuenten con ciertas habilidades que les permitan adaptarse a dicha tecnología para el cumplimiento de los objetivos planteados por los centros de trabajo.

Así las cosas, la hipótesis del cambio tecnológico sesgado asegura que tras la introducción de equipo de cómputo en los procesos productivos se incrementa la demanda de trabajo calificado, provocando un sesgo en favor de este grupo y en detrimento del grupo de trabajadores no calificados, quienes ven reducir su salario y ven correr el riesgo de ser desplazados del mercado de trabajo por no contar con las habilidades requeridas para el uso de ciertas tecnologías. Este proceso provocaría un incremento en la desigualdad salarial, debido a una mejora en los salarios de trabajadores con habilidades específicas y a una disminución del salario de los menos calificados.

Sin embargo, después de la revisión de literatura expuesta en este documento, se puede concluir que una hipótesis planteada para países desarrollados tiene distintos efectos al ser probada para los países de América Latina, sobre todo cuando el cambio tecnológico de dichos países es resultado de un proceso de deslocalización de la mano de obra, así como de una dependencia tecnológica que no ha permitido el desarrollo de innovación y tecnología propia.

Dado lo anterior, se debe dejar en claro que las implicaciones del cambio tecnológico en los mercados de trabajo latinoamericanos exigen un mayor análisis, lo que nos lleva a profundizar en los datos necesarios para explorar este tópico, los cuales dependiendo del enfoque del estudio idealmente contendrían información oportuna sobre las características de las unidades productivas y su desempeño económico. En el caso de la perspectiva individual, hemos propuesto tres bloques de datos para las encuestas en hogares: i) características sociodemográficas de la población, ii) características laborales de los individuos, y iii) dotación de habilidades tecnológicas.

Referencias

- Acemoglu, D. (2002). Technical Change, Inequality, and the Labor Market. *Journal of Economic Literature*, 40(1).
- Acemoglu, D. y Autor, D. (2011). *Skills, Tasks and Technologies: Implications for Employment and Earnings*. NBER Working Paper No. 16082.
- Autor, D. H., Katz, L. F. y Krueger, A. B. (1998). Computing Inequality: Have Computers Changed the Labor Market? *The Quarterly Journal of Economics*, 113(4), 1169-1213.
- Arango, L., Posada, C. y Uribe, J. (2005). Cambios en la estructura de salarios urbanos en Colombia, 1984-2000. *Lecturas de Economía*, (63), 7-39.
- Baldwin, R. y Cain, G. (1997). *Shifts in U.S. Relative Wage: The Role of Trade, Technology, and Factor Endowments*. Institute for Research on Poverty Discussion Paper No. 1132.
- Bailey, T. (1990). *Changes in the Nature and Structure of Work: Implications for Skill Requirements and Skill Formation*. Berkeley: National Center of Research in Vocational Education.
- Berman, E., Bound, J. y Machin, S. (1998). Implications of Skill-Biased Technological Change: International Evidence. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(4), 1245-1279.

- Berman, E., Bound, J. y Griliches, Z. (1993). *Changes in the Demand for Skilled Labor within US Manufacturing Industries: Evidence from the Annual Survey of Manufacturing*. NBER No. w4255.
- Benavente, J. M., Bravo, D. y Montero, R. (2011). Wages and Workplace Computer Use in Chile. *The Developing Economies*, 49(4), 382-403.
- Calderón, C., Ochoa, G. y Huesca, L. (2017). Mercado laboral y cambio tecnológico en el sector manufacturero de las regiones de México (2005-2014). *Economía, Sociedad y Territorio*, 17(54), 523-560.
- Camberos, M., Huesca, L. y Castro, D. (2013). Cambio tecnológico y diferencial salarial en las regiones de México: un análisis de datos de panel para el sector servicios. *Estudios Fronterizos*, 14(28), 187-211.
- Davis, S. T. y Haltiwanger, J. (1992). Gross Job Creation, Gross Job Destruction, and Employment Reallocation. *The Quarterly Journal of Economics*, 107(3), 819-863.
- DiNardo, J. E. y Pischke, J. S. (1996). The Returns to Computer Use Revisited: Have Pencils Changed the Wage Structure Too? NBER No. w5606.
- Dunne, T., Foster, L., Haltiwanger, J. y Troske, K. (2004). Wage and Productivity Dispersion in US Manufacturing: The Role of Computer Investment. *Journal of Labor Economics*, 22(2), 397-429.
- Félix-Verduzco, G. y Torres-García, A. J. (2018). Prima salarial al uso de computadora en el trabajo. Evidencia de microdatos para México. *El Trimestre Económico*, 85(337), 137-168.
- Freeman, R. (1976). *The Overeducated American*. Nueva York: Academic Press.
- Gottschalk, P. y Joyce, M. (1991). *Changes in Earnings Inequality — An International Perspective*. US Working Paper Series No. 66.
- Huesca, L. y Ochoa, G. (2016). Desigualdad salarial y cambio tecnológico en la Frontera Norte de México. *Problemas del Desarrollo*, 47(187), 165-188.
- Katz, L. F. y Murphy, K. M. (1992). Changes in Relative Wages, 1963-1987: Supply and Demand Factors. *The Quarterly Journal of Economics*, 107(1), 35-78.
- Krueger, A. (1993). How Computers Have Changed the Wage Structure: Evidence from Microdata, 1984-1989. *The Quarterly Journal of Economics*, 108(1), 33-60.
- Liu, J. T., Tsou, M. W. y Hammitt, J. K. (2004). Computer Use and Wages: Evidence from Taiwan. *Economics Letters*, 82(1), 43-51.
- Manacorda, M., Sánchez-Páramo, C. y Schady, N. (2010). Changes in Returns to Education in Latin America: The Role of Demand and Supply of Skills. *ILR Review*, 63(2), 307-326.

- Michaels, G., Natraj, A. y Van Reenen, J. (2010). *Has ICT Polarized Skill Demand? Evidence from Eleven Countries over 25 Years*. NBER No. 16138.
- Navarro, L. (2010). The Impact of Internet Use on Individual Earnings in Latin America. *Development Research Working Paper Series* No. 2010/11.
- Ng, Y. C. (2006). Levels of Computer Self-Efficacy, Computer Use and Earnings in China. *Economics Letters*, 90(3), 427-432.
- Oosterbeek, H. y Ponce, J. (2011). The Impact of Computer Use on Earnings in a Developing Country: Evidence from Ecuador. *Labour Economics*, 18(4), 434-440.
- Rodríguez López, S. (2014). Wage Inequality in Uruguay: Technological Change Impact on Occupational Tasks. *Serie Documentos de Trabajo/FCEA-IE; DT15/14*.
- Rodríguez, R. y Castro, D. (2012). Efectos del cambio tecnológico en los mercados de trabajo regionales en México. *Estudios Fronterizos Nueva Época*, 13(26).
- Romer, P. (1990). Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98(5, Part 2), S71-S102.
- Torres, A. y Félix, G. (2017). Rendimiento al uso de PC en México: un análisis comparativo por sector de actividad. En *Compendio de resultados de investigación aplicada en la ingeniería* (pp. 139-155), s. I.
- Torres, A. y Ochoa, G. (2018). Desigualdad salarial asociada al uso de TIC en México: un análisis por ocupaciones. *Cuadernos de Economía*, 37(74).

Sobre los autores

Silvia Johana Cañas-Duarte

Ingeniera química y microbióloga, con énfasis en biotecnología y bioinformática, y M. Sc. en Ciencias Biológicas (Universidad de los Andes). Actualmente, cursa estudios de doctorado en Biología de Sistemas en Harvard University, donde hace parte del laboratorio del Dr. Johan Paulsson. Su investigación se enfoca en entender fenómenos de naturaleza estocástica en sistemas biológicos —en particular plásmidos y bacterias y su relación con fenómenos de resistencia y tolerancia a antibióticos— con técnicas que permiten estudiar células individuales por varias generaciones. Desde el 2016, hace parte del equipo de Clubes de Ciencia Colombia y es cofundadora de la Corporación ScienteLab, enfocada en la promoción del desarrollo de ciencia, tecnología e innovación como herramientas de desarrollo económico y social en Colombia.

Correo electrónico: silviacanasduarte@g.harvard.edu

Jaime Enrique Cascante-Vega

Ingeniero biomédico y estudiante de último año de Ingeniería Electrónica de la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia). Actualmente, es miembro del grupo de investigación en control y automatización GIAP y del grupo de investigación en matemática y biología computacional BIOMAC de la misma institución. Sus intereses de investigación incluyen entender las dinámicas de enfermedades tropicales desde el punto de vista ecológico y su relación con la distribución óptima de recursos de consumo humano (energía, agua, gas) usando técnicas de teoría evolutiva de juegos, epidemiología y aprendizaje estadístico en datos.

Correo electrónico: je.cascante10@uniandes.edu.co

Geraldine Andrea Cuéllar-Alturo

Ingeniera biomédica egresada de la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia). Durante su pregrado estuvo involucrada en varios proyectos de investigación en los

que participó activamente en diversas áreas como modelado 3D e investigación en educación. Actualmente, forma parte del Centro de Datos de una industria farmacéutica.

Correo electrónico: ga.cuellar10@uniandes.edu.co

Mario Fernando De la Rosa-Rosero

Egresado de Ingeniería de Sistemas y Computación y maestro en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad de los Andes. Hizo el Diplomado de Estudios Antropológicos y el Doctorado en Informática en el Institut National Polytechnique de Grenoble, en Francia. Fue profesor asistente en 1997 profesor asociado desde el 2001 en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad de los Andes, donde también es miembro del grupo de investigación Imagine. Asimismo, hace parte de los capítulos IEEE Robotics & Automation e IEEE Computational Intelligence y de la asociación profesional ACM. Sus áreas de experticia son la robótica móvil y la computación visual interactiva (en robótica móvil, en las temáticas de planificación de caminos geométricos, interacción humano-robot, *machine learning*, sistemas cooperativos y enseñanza de la programación basado en ambientes robóticos simulados; en computación visual, en los temas de interacción humano-computador y diseño y construcción de ambientes 3D).

Correo electrónico: fde@uniandes.edu.co

Guillermo Foladori

Profesor titular de la Universidad Autónoma de Zacatecas (México). Coodinador de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (RELANS). Doctor en economía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Posdoctorado de la Universidade Estadual de Campinas (Brasil). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Conacyt. Miembro de la Red Mexicana de Nanociencia y Nanotecnología. Autor de artículos sobre nanotecnología en diversas revistas de circulación internacional. Coeditor de una serie de libros sobre nanotecnologías en América Latina publicados por la editorial Miguel Ángel Porrúa (México). Recientemente, coeditó el libro *Cadenas de producción de las nanotecnologías en América Latina: Argentina, Brasil, Colombia y México* (2018), en el cual se incluyen capítulos de su autoría.

Correo electrónico: gfoladori@gmail.com

Miguel García-Guerrero

Licenciado en Física (Universidad Autónoma de Zacatecas), maestro en Ciencia, Tecnología y Sociedad (Universidad de Quilmes, Argentina) y doctor en Estudios del Desarrollo (Universidad Autónoma de Zacatecas). Inició su trayectoria en la divulgación científica en 1995. Es responsable de actividades de divulgación del Museo de Ciencias de la Universidad Autónoma de Zacatecas y presidente de Recreación en Cadena AC, la Red Mexicana de Talleristas de Ciencia. Es autor de tres libros y coordinador de otros ocho, todos en temas de divulgación. Ha publicado doce artículos en revistas arbitradas y diez capítulos de libros. Sus trabajos más recientes son “El papel de la experiencia histórica y la confianza en la comunicación de tecnologías emergentes: el caso de las nanotecnologías” y “*Keeping the Flame Lit: The Value of the Long-Term Permanence of a Science Club*”.

Correo electrónico: miguel@grupoquark.com

Noela Invernizzi

Profesora asociada Universidad Federal de Paraná (Brasil). Cooordinadora de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (RELANS). Doctora en Política Científica y Tecnológica (Universidad Estatal de Campinas) con un posdoctorado del Center for Science Policy and Outcomes (Universidad de Columbia). Especialista en tecnología y trabajo y educación científica y tecnológica. Profesora de la Universidad de la República y la Universidad Católica, en Uruguay, e investigadora de la Universidad Federal de Paraná (Brasil). Autora de artículos sobre nanotecnología en revistas como: *Revista Tecnología e Sociedade*; *Journal of Nanoparticle Research*; *International Journal of Technology and Globalization*; *Nanotechnology Law & Business*; *Redes, Ciencia, Tecnología y Sociedad*; *Science*; *Technology and Society* y *Philosophy Today*. Autora y coeditora de varios libros, entre los que se destacan: *Cadenas de producción de las nanotecnologías en América Latina: Argentina, Brasil, Colombia y México* (coeditado con G. Foladori, J. F. Osma y É. Záyago Lau) y *Nanotecnologías en América Latina: trabajo y regulación* (coeditado con G. Foladori, A. Hasmy y E. Záyago Lau).

Correo electrónico: noela@ufpr.br

Juan Guillermo Lalinde-Pulido

Ingeniero de sistemas de la Universidad EAFIT, matemático de la Universidad Nacional y doctor en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (España). Es profesor investigador de la Universidad EAFIT. Ha sido investigador visitante en el Institute for Human and Machine Cognition (IHMC), en Pensacola (Estados Unidos) y en Purdue University, en Indiana (Estados Unidos). Fue consejero del programa de Electrónica, Telecomunicaciones e Informática (ETI) de Colciencias (2005-2011). Actualmente, es investigador del Centro de Excelencia y Apropiación en Big Data

y Analytics (Caoba), director científico del centro de computación científica APOLO (EAFIT), responsable del componente de tecnología en Proyecto 50 y coordinador de la Maestría en Ciencias de los Datos y Analítica.

Correo electrónico: jlalinde@eafit.edu.co

Jesús Alberto Navas-Sierra (Editor)

Doctor en Ciencias Económicas y en Ciencias Jurídicas, y maestro en Sociología del Desarrollo. Ha sido profesor e investigador por treinta años -en universidades de Colombia, Reino Unido, Francia, España, Canadá, Estados Unidos y México- en el tema de la historia política, diplomática y económica del continente americano (siglos XVIII y XIX). Ha sido miembro del equipo científico de varios eventos internacionales sobre Francisco de Miranda y Alejandro de Humboldt. Es autor de ocho libros y más de cien artículos publicados en revistas europeas y latinoamericanas. *Ciencia y reinserción internacional: las ‘expediciones científicas’ de 1822, un caso de Veho Historia* y *¿La Veho Historia — Historia Vectorial —, un nuevo paradigma histórico-científico?* son sus dos trabajos más recientes. Actualmente, es promotor del proyecto BicentenarioBis Hispanoamericano.

Correo electrónico: vehohistoriavectorial@gmail.com

Gloria Lizeth Ochoa-Adame

Doctora en Ciencias en Desarrollo Regional del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. (posgrado reconocido por el Programa Nacional de Posgrados de Calidad, México). Es profesora-investigadora de la Facultad de Economía Internacional de la Universidad Autónoma de Chihuahua y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Ha realizado estancias de investigación en el Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM y en el Colegio de la Frontera Norte de México. Sus líneas de investigación son sobre cambio tecnológico, mercado laboral, desigualdad salarial y regional.

Correo electrónico: gochoa@uach.mx

María Isabel Pérez-López

Microbióloga con maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad de los Andes. Su énfasis de investigación es en resistencia bacteriana, péptidos antimicrobianos y biopelículas. En el 2017, fue investigadora asociada del Departamento de Biología de Sistemas de la Universidad de Harvard. Es coordinadora del Laboratorio de Biofísica y profesora asistente de los cursos de Biología Molecular, Bacteriología y Alimentos, en la Universidad de los Andes. También es colaboradora en distintos

proyectos de investigación en el Laboratorio de Micología y Fitopatología y en el Centro de Investigaciones Microbiológicas. Fue jurado en la vigésima versión del Concurso Nacional Otto de Greiff (Universidad Nacional de Colombia). Miembro evaluador del Club de los Mejores de iNNpula (Colombia). Ha participado en congresos internacionales, nacionales y ha escrito artículos relacionados con resistencia bacteriana desde la perspectiva de la lipidómica y bioprospección.

Correo electrónico: maria_perezlopez@hms.harvard.edu

Olga Lucía Quintero-Montoya

Primera egresada de Ingeniería de Control (Universidad Nacional de Colombia). Doctora en Ingeniería de Sistemas de Control del Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan (Argentina). Sus áreas de experticia son la teoría de estimación en sistemas no lineales no gaussianos, la inteligencia artificial y el aprendizaje de máquina. Es consultora en diferentes sectores productivos de Latinoamérica y profesora titular del Departamento de Ciencias Matemáticas de la Universidad EAFIT, donde es directora del Doctorado en Ingeniería Matemática. Investigador sénior de Colciencias, se desempeña a nivel internacional como profesora visitante del Departamento de Computer Science de la Universidad de Cornell y del Departamento de Applied Mathematics de TUDelft. Sus principales contribuciones se centran en la creación de algoritmos y sistemas expertos para diversos problemas. Ha desarrollado aplicaciones en detección de emociones en señales biomédicas y detección de patrones para seguridad y defensa. Sus áreas de investigación actuales son: *data assimilation*, *MDL for machine learning complexity*, *fooling* y simplificación de información.

Correo electrónico: oquinte1@eafit.edu.co

Roberto Javier Rueda-Esteban

Médico, maestro en Educación y en Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes. Actual profesor y coordinador de las áreas de Anatomía y Embriología de la misma institución. Colíder del Grupo de Investigación en Anatomía para la Educación, con experiencia investigativa en la aplicación de impresión 3D en educación médica, metodologías innovadoras en educación médica y técnicas anatómicas, así como en la aplicación de herramientas de ingeniería a la educación e investigación en anatomía, embriología y áreas afines.

Mariajosé Serna-Ayala

Ingeniera biomédica egresada de la Universidad de los Andes, con énfasis en neurociencias y diseño industrial. Durante su pregrado, participó activamente en diversos

proyectos de investigación relacionados con modelado matemático de sistemas biológicos y análisis de imágenes médicas, entre otros. Actualmente, forma parte del Centro de Datos de una industria farmacéutica.

Correo electrónico: m.serna10@uniandes.edu.co

Aldo Josafat Torres-García

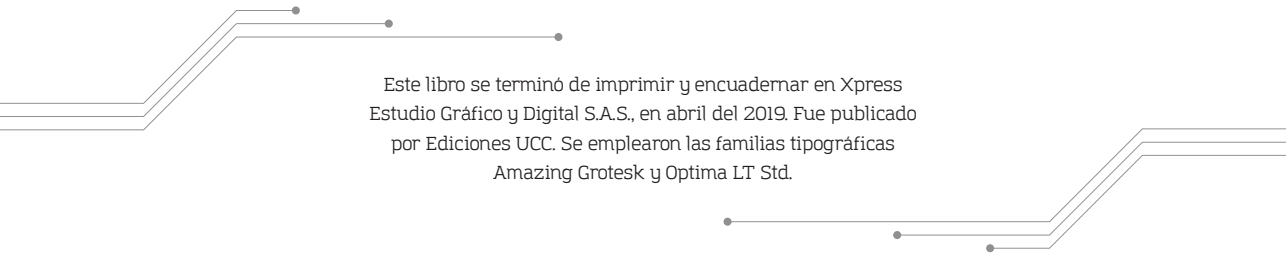
Doctor en Economía Regional del Centro de Investigaciones Socioeconómicas de la Universidad Autónoma de Coahuila —egresado con mención honorífica— (el posgrado reconocido por el Programa Nacional de Posgrados de Calidad – PNPC México). Es profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Economía de la Universidad Autónoma de Chihuahua y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus líneas de investigación son el cambio tecnológico, la brecha digital y aquellos fenómenos que se suscriben dentro de la economía regional y urbana. Ha sido profesor visitante en la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad Autónoma de Coahuila (México). Además, ha colaborado en proyectos de investigación, reformas curriculares y proyectos de consultoría para la iniciativa privada.

Correo electrónico: ajtorres@uach.mx

Edgar Vieira-Posada

Doctor en Estudios Latinoamericanos de la Universidad de París III Sorbona Nueva, maestro en Relaciones Internacionales de la Universidad Javeriana, especialista en Desarrollo Económico de IRFED (París) y economista de la Universidad de Medellín. Actualmente, es director del Centro de Pensamiento Global (CEPEG) en la Universidad Cooperativa de Colombia y coordinador del Grupo de Reflexión sobre Integración y Desarrollo en América Latina y Europa (GRIDALE). Fue profesor titular del Colegio de Estudios Superiores de Administración y director de la Especialización en Integración en el Sistema Internacional en la Universidad Javeriana. Autor de cinco libros; los más recientes son: *Los actuales desafíos del proceso de globalización* (2016); *La globalización en un mundo en transformación* (2012) y *La formación de espacios regionales en la integración de América Latina* (2008). También ha escrito capítulos de libros y es editor de ocho libros sobre el TLC de Colombia con Estados Unidos, Canadá y Corea del Sur; sobre China; sobre la Alianza del Pacífico; sobre energía, y sobre infraestructura física.

Correo electrónico: edgar.vieirap@ucc.edu.co



Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en Xpress
Estudio Gráfico y Digital S.A.S., en abril del 2019. Fue publicado
por Ediciones UCC. Se emplearon las familias tipográficas
Amazing Grotesk y Optima LT Std.

En cumplimiento de los objetivos del **Centro de Pensamiento Global – CEPEG** de divulgar y esclarecer varios de los procesos que más inciden en el actual Sistema Internacional, se han venido desarrollando colecciones con temáticas diferentes. La primera, iniciada en el 2016, es la colección de bolsillo **Acontecer Mundial** que, en dos años y medio, ha logrado la publicación de nueve tomos. Cada uno de ellos ha sido escrito por uno o dos autores, y han abordado temáticas de interés en el contexto del mundo globalizado. De esta manera, se han dado a conocer los elementos y características fundamentales de problemáticas como el cambio climático; el Tratado de la Antártida; el multilateralismo y los acuerdos comerciales; la demografía y las migraciones; las teorías de la integración y el interregionalismo transcontinental, y la globalización.

Tecnologías disruptivas del proceso de globalización es el libro con el que iniciamos nuestra nueva colección investigativa **Pensamiento Global**. Hemos escogido esta temática por la gran influencia que han tenido estas tecnologías sobre el proceso globalizador, principalmente porque el cambio de olas de la globalización ha estado marcado por los avances en este campo. Así, los textos propuestos en este primer volumen son un material estratégico para comprender cómo las nuevas tecnologías están transformando la comprensión de los contextos, el sentido de vida y las dinámicas económicas, culturales, políticas y sociales.

Como complemento de esto, el segundo libro, *Pensamiento empresarial latinoamericano en el siglo XXI*, editado por Rita Giacalone, se enfoca en el papel fundamental que tienen los empresarios como dinamizadores u obstaculizadores frente a la consolidación del proceso de globalización. De esta manera, el análisis tecnológico que se desarrolla en el primer libro genera en contrapunto con la influencia que pueden generar los actores no estatales en los diferentes procesos globales.

Con estos materiales, el CEPEG pone a disposición de profesores, estudiantes de pregrado y de posgrado y público en general interesado en estas problemáticas de un proceso globalizador multidimensional, obras de todo tipo que les permitirán informarse y profundizar sobre un contexto mundial en constante cambio.

Edgar Vieira-Posada

Director Centro de Pensamiento Global – CEPEG
Universidad Cooperativa de Colombia

