

Desafíos para el diseño de un Sistema Inteligente Nacional de Atención a Emergencias Sanitarias (SINAES) en México: lecciones del COVID-19

Recibido: 14 de mayo de 2023 Aceptado: 11 de julio de 2023

Enrique Cabrero Mendoza¹

Víctor Gerardo Carreón Rodríguez²

Miguel Adolfo Guajardo Mendoza³

Resumen

El objetivo de este artículo es identificar las bases para construir un Sistema Inteligente Nacional de Atención a Emergencias Sanitarias en México basado en tecnologías disruptivas. Para ello, se analiza la información del Programa de Estímulos a la Innovación entre 2009 y 2018, utilizando un modelo de Red Neuronal Artificial. Se encuentran 202 Proyectos de Tecnologías Disruptivas relacionados con Emergencias Sanitarias, específicamente con pandemias o epidemias (3% del total). De estos, 88% surgieron en colaboración con algún Centro Público de Investigación o con alguna Institución de Educación Superior. Además, 44% son de biotecnología, 35% de inteligencia artificial, 17% de nanotecnología, 4%

de manufactura aditiva y 2% de realidad aumentada. Aunque no existe información pública sobre la evolución de estos proyectos después de 2018, son un punto de partida para el diseño de soluciones innovadoras a las complejas enfermedades que en el futuro podrían azotar a la humanidad y a nuestro país, en particular.

Palabras clave

Tecnologías disruptivas, COVID-19, Inteligencia artificial, Desastres.

Abstract

The goal is to identify if there are bases to build an Intelligent National Epidemiological Surveillance System in Mexico (SINAES), based on disruptive technologies. It was analyzed the public information of the Innovation Incentives Program (PEI) that contains data for 5,814

¹ Director del Instituto de Investigación en Políticas Públicas y Gobierno. Universidad de Guadalajara. Mexicano. E-mail: enrique.cabrero@cucea.udg.mx

² Profesor - Investigador del Laboratorio Nacional de Políticas Públicas. Centro de Investigación y Docencia Económicas. Mexicano. E-mail: victor.carreon@cide.edu

³ Profesor - Investigador de El Colegio Mexiquense. Mexicano. ORCID: 0009-0009-7448-4232 E-mail: mguajardo@cmq.edu.mx

projects executed between 2009 and 2018. An Artificial Neural Network (ANN) model, a methodology little used in this type of study. There is found 202 Disruptive Technologies Projects related to Health Emergencies (ProTeDES) (3% of the total PEI). 88% of these projects is developed in collaboration with Public Research Centers (CPI) and Higher Education Institutions (IES). In addition, 44% is from biotechnology, 35% from artificial intelligence, 15%

from nanotechnology, 4% from additive manufacturing, and 2% from augmented reality. There is no public information on the evolution of these ProTeDES; even so, they are a starting point for the design of innovative solutions to the complex diseases that could plague humanity, and especially Mexico, in the future.

Keywords

Disruptive technologies, COVID-19, Artificial intelligence, Disasters.

Introducción

Los efectos de la pandemia por COVID-19 han sido devastadores en todo el planeta en al menos tres componentes: (i) pérdidas de vidas humanas; (ii) secuelas que sufren quienes se recuperaron de la enfermedad; y, (iii) contracción económica en las naciones, a las que les tomará varios años regresar a sus niveles de bienestar previos a esta crisis sanitaria. Ante la certeza de en el futuro se presenten emergencias sanitarias similares, es clara la urgencia de utilizar la tecnología para hacerles frente, en particular las tecnologías disruptivas de nuestra época: Biotecnología (BIO), Inteligencia Artificial (IA), Nanotecnología (NANO), Manufactura Aditiva (MA) y Realidad Aumentada (RA).

El objetivo del artículo es identificar las bases para construir Capacidades Tecnológicas para Emergencias Sanitarias (CaTES) en México, particularmente en torno a estas tecnologías disruptivas. Para ello, se analiza el Padrón de Beneficiarios del Programa de Estímulos a la Innovación (PEI) que contiene información pública de 6,472 proyectos de innovación y desarrollo tecnológico desarrollados de forma conjunta, de 2009 a 2018, por empresas privadas, Centros Públicos de Investigación (CPI) e Instituciones de Educación Superior (IES). Esta es la base de datos pública más completa en México sobre innovación tecnológica que permite acceso a microdatos. Existen otros estudios que han detectado proyectos relacionados con fenómenos sanitarios, lo cual comprende pandemias, epidemias,

contaminación ambiental, así como plagas (Cabrero et al., 2020). Sin embargo, este artículo se concentra específicamente en pandemias.

La metodología utilizada se basa en una Red Neuronal Artificial (RNA), implementada en 3 etapas, para identificar los Proyectos de Tecnologías Disruptivas para Emergencias Sanitarias (ProTeDES). Esta metodología innovadora empieza a cobrar importancia en las ciencias sociales porque permite procesar gran cantidad de información e identificar patrones que no son directamente observables (Thierer et al, 2017; Schwab et al, 2018; Savaget et al, 2019; Strubel et al, 2019; Lee, 2020; Batarseh et al, 2020). Finalmente, a partir de los ProTeDES identificados se realizó un análisis de estadística descriptiva que arroja pistas sobre los principales actores que deben considerarse para construir una estrategia que incorpore estas tecnologías en el diseño e implementación de política pública en materia de salud.

La estructura del artículo es la siguiente. En la primera sección se presenta una descripción de los principales conceptos asociados a una crisis en términos generales. La segunda detalla la metodología utilizada para identificar los ProTeDES. En la tercera se analizan los desarrollos tecnológicos de este tipo en México. Finalmente, se presentan algunas reflexiones generales.

¿Qué entendemos por crisis?

Como dice Devlin (2007), una crisis es un “tiempo inestable” que produce resultados no deseados, puede generar daños irreparables y poner en peligro la sobrevivencia misma de una organización o de un conjunto de estas. Otros autores⁴ la definen como un evento que: (i) tiene baja probabilidad de ocurrir; (ii) tiene un vasto impacto negativo; (iii) los medios para resolverla no están claros; y, (iv) no siempre su resolución puede ser rápida⁵. También, el concepto de crisis se ha definido como una “amenaza seria a las estructuras básicas o a los valores y normas fundamentales de un sistema”; y en todos los casos requiere “tomar decisiones vitales bajo presiones de tiempo y circunstancias altamente inciertas”⁶.

Para precisar una crisis en particular habría que hacer referencia a: (i) sus causas; (ii) sus efectos (nivel de severidad y sus consecuencias); y, (iii) las posibles estrategias para enfrentarla. Así, las tres características de una crisis, según Mena

⁴ Diversos autores analizan los alcances del concepto “crisis”; una sistematización y compilación de textos muy útil a revisar es la de Mena (2011) quien refiere las ideas de Mitroff et al. (1996), Gilpin y Murphy (2008), Pearson y Clair (1998), y Toombs (2007) entre varios más.

⁵ El caso actual del COVID-19 es un ejemplo típico de este tipo de eventos.

⁶ Rosenthal et al. (1989).

(2011) son: (1) se trata de una *amenaza* al sistema; (2) requiere ser atendida con *urgencia*; y, (3) transcurre en medio de un entorno de *incertidumbre*. La idea de sistema es útil para entender y enfrentar una crisis y así poder manejarla, como insiste Perrow (1984) “las crisis son productos residuales de cualquier sistema complejo”.

Mena (2011) insiste que las crisis están destinadas a ocurrir porque son una “expresión fáctica” de un sistema complejo, el cual opera también en un entorno complejo, lo que genera una interacción múltiple de elementos para poder funcionar, y a mayor número de elementos e interacciones entre ellos, mayor el riesgo de que surja una crisis. Desde esta perspectiva, las crisis son eventos que ocurren en algún momento en todo sistema, ya sea una organización, una región, un país, o incluso en el planeta, como la pandemia Covid-19 que ha tenido un efecto extendido y global. Esto es congruente con el planteamiento de Beck (2002) sobre la “sociedad del riesgo” que implica una vulnerabilidad cada vez mayor ante la creciente interconexión de elementos y la creciente complejidad del desarrollo económico, social y ambiental.

Los elementos pertinentes sobre el tema son: hasta dónde es posible prevenir las crisis; y, cuando una se materializa, hasta dónde y qué tan rápido es posible gestionarla. Algunos estudios han insistido en el concepto de “gestión de crisis”, que consiste en: (i) entender, identificar y visualizar las amenazas, y a partir de ello establecer una acción de monitoreo constante sobre las mismas; (ii) tener un Plan de Manejo de Crisis (PMC) que permita una rápida reacción ante la urgencia con que debe responderse; y, (iii) minimizar la incertidumbre, que siempre existirá, mediante un flujo permanente de información pertinente y oportuna.

Por lo tanto, la idea de gestión de crisis no se refiere a una actividad reactiva y esporádica, sino más bien a un proceso continuo que debe formar parte de la gestión estratégica permanente de toda organización o conjunto de organizaciones. La gestión de crisis consiste en un conjunto de actividades o procedimientos que permitan una rápida toma de decisiones que en el menor plazo posible valore con información robusta, las características de las amenazas y se ponderen los riesgos para la toma de decisiones (Mena 2011). Lo anterior es importante dado que, de no llevar a cabo este proceso continuo de gestión de crisis, la calidad de las decisiones será muy baja en el momento requerido debido al entorno de estrés excesivo en el que se toman dichas decisiones (Fink, 1986) y, como consecuencia, puede generarse una parálisis que conlleva una pérdida vital de tiempo para reaccionar.

En una situación de crisis, si la acción se pasma, el costo puede ser muy alto. Cabe también mencionar que la literatura sobre el tema de gestión de crisis insiste en el hecho que es necesario visualizar el “ciclo de vida” de la crisis en cuestión y de su gestión, dado que los instrumentos y capacidades que se requieren en cada fase son diferentes, como se detalla a continuación.⁷

Fase de prevención. Fase en que se requieren capacidades de análisis del entorno, de identificación de amenazas, seguimiento y comprensión de su evolución. Se requiere de la visión prospectiva de expertos, así como de la construcción de sistemas de información que hagan posible el monitoreo de variables y la simulación de escenarios probables.

Fase de preparación. En esta fase se deberán visualizar acciones posibles frente al surgimiento de una situación de crisis mediante un PMC, el cual deberá ser actualizado de manera continua. A cada escenario previsto en la fase anterior deberá corresponder un conjunto de acciones a desplegar en el momento de la crisis. Por una parte, la construcción de redes de instituciones y actores para coordinar actividades y, por la otra, prever la disponibilidad de recursos financieros, técnicos, humanos, así como identificar la infraestructura requerida y su disponibilidad. Las capacidades prospectivas y logísticas a partir de técnicas de simulación serán requeridas de manera importante en esta etapa.

Fase de identificación y reconocimiento de la crisis. Así sean incipientes las manifestaciones de una situación de crisis en curso, el sistema de monitoreo de amenazas y análisis de su evolución deberá ser capaz de detectar sus primeras evidencias. Lo crucial en esta etapa es tener la mayor claridad posible sobre la magnitud y ritmo del problema que se enfrenta. Los instrumentos necesarios en esta fase están asociados a la puesta en marcha del PMC, con los ajustes obligados una vez que se tiene información más precisa sobre las características de la situación que se enfrenta. El análisis y definición de una estrategia concreta es indispensable, por lo que la integración de un modelo con la información disponible y cursos alternativos de acción consumirá buena parte de este momento.

Fase de contención. Las primeras medidas de acción concreta tendrán el objetivo de acotar la magnitud del disparo de la crisis. Dependiendo del tipo de crisis, es claro que la visión de expertos vuelve a ser muy necesaria para entender lo mejor posible la manera como se está manifestando la situación. Es estratégico en esta etapa establecer los canales de información y comunicación tanto internos como

⁷ Ideas tomadas a partir de Augustine (2000) y de Mena (2011) y complementadas por los autores.

externos: una situación de crisis como es bien sabido puede empeorar simplemente con el mal manejo de la información, o con el flujo insuficiente de la misma, lo cual puede generar confusión, pánico y caos adicional. La comunicación transparente y oportuna es fundamental por lo que los sistemas de comunicación y el manejo de las tecnologías de información es crucial en esta fase.

Fase de resolución. Esta fase consiste en el restablecimiento de las actividades básicas del sistema para que le permitan operar, si no en plena normalidad, al menos que recupere su capacidad de funcionamiento en un alto porcentaje. El restituir el flujo de recursos y comunicación entre los actores y organizaciones afectadas por la crisis permitirá estabilizar nuevamente la situación, además de generar la sensación de recuperación de la normalidad, que es importante para el conjunto de actores y elementos afectados. Es importante tener en cuenta que es poco probable la resolución total de la situación de crisis. Lo habitual es que la crisis dejará saldos negativos en pérdidas de recursos, de infraestructura, de niveles de bienestar y/o, lamentablemente, incluso en pérdidas humanas. Sin embargo, también es cierto que las situaciones de crisis generan áreas de oportunidad para fortalecer las alianzas, las organizaciones, los consensos e implantar un espíritu de cuerpo sólido que permita avanzar en la resiliencia en el menor plazo posible. Los liderazgos son fundamentales en esta etapa, así como el establecimiento de acuerdos hacia el futuro inmediato.

Fase de aprendizaje. Esta fase consiste en la “capacidad de absorción” de la organización, o conjunto de organizaciones, a partir de la experiencia vivida. Es frecuente no darle mucha importancia a esta etapa bajo la falsa sensación de que la crisis ha sido superada; sin embargo, los costos pueden ser muy altos por no aprovechar la cantidad de información acumulada y que debe ser incorporada al sistema continuo de gestión de crisis para así evitar la recurrencia de los errores cometidos y entender mejor la naturaleza del tipo de crisis que se vivió. El aprendizaje es fundamental para evitar que crisis recurrentes sigan generando daños graves, permite además mejorar los sistemas de monitoreo de amenazas, de prevención, y acelerar la capacidad de reacción. De igual manera, se requiere evaluar el desempeño integral que tuvieron los actores, unidades, organizaciones, durante la situación de crisis, los errores de cálculo y de información que se tuvieron, lo que permite además mejorar la visión estratégica que se tenga hacia el corto, mediano y largo plazos.

Es evidente que el término “ciclo de vida” de una crisis es una simple aproximación normativa y conceptual, con el objeto de aclarar y organizar ideas en torno a una situación compleja que por naturaleza no responde a una idea ni secuenciada ni

ordenada, como el ciclo de vida lo supone. Sin embargo, más allá de las limitaciones de este conjunto de ideas, la estrategia de implementación de un sistema de “gestión de crisis” es de gran utilidad. A partir de un sistema de esta naturaleza, se podrá desplegar el desarrollo de capacidades humanas, institucionales, organizacionales, y de generación y manejo de conocimiento científico y tecnológico en torno a posibles escenarios de crisis.

Un país, una región, una ciudad, que lleve a cabo este ejercicio, sin duda, podrá sortear de mejor manera las situaciones de crisis que enfrente, sean relacionadas con la salud, el bienestar, el medio ambiente, el cambio climático o la economía, entre muchos otros tipos de crisis que podríamos imaginar. Es decir, el organizar un sistema que funcione continuamente para la gestión de crisis y visualizar las etapas que pueden generarse a partir de ella, así como las consecuencias probables, ayuda a elaborar un portafolio de acciones a emprender y a entender las capacidades humanas, científicas y tecnológicas que se requiere fortalecer.

Metodología

Nuestro análisis se basa en el padrón de beneficiarios del PEI que contiene información de 6,472 proyectos de tecnología. El objetivo general de este programa era incentivar, a nivel nacional, la inversión de las empresas en actividades y proyectos relacionados con investigación, desarrollo tecnológico e innovación. Los resultados que se reportan en este estudio surgieron a partir del uso de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNA).

Una RNA es un tipo específico de IA que puede desarrollar un conjunto de tareas con capacidades similares a la inteligencia humana, pero de forma mucho más rápida (Lee, 2020). Estas herramientas son utilizadas para el reconocimiento de patrones en datos, textos o imágenes, cuya resolución es complicada computacionalmente con sistemas tradicionales. Específicamente, en este artículo se utiliza una RNA para asociar los proyectos de la base del PEI con alguna(s) de las cinco tecnologías estudiadas.

Las RNA están siendo utilizadas en diferentes niveles de análisis, donde dos de ellos sobresalen notoriamente. Primero, está el nivel micro, que se enfoca en aspectos técnicos de la arquitectura de las redes para maximizar su poder predictivo. Este nivel se considera de dominio de los expertos en ciencias computacionales (Lee, 2020). Segundo, en el nivel macro están los estudios que analizan el impacto de las RNA de forma más amplia en toda la sociedad, o en sectores específicos como el militar, económico o judicial (Lee, 2020). En este

artículo, la RNA no es el objeto de estudio, sino un medio más efectivo para procesar información.

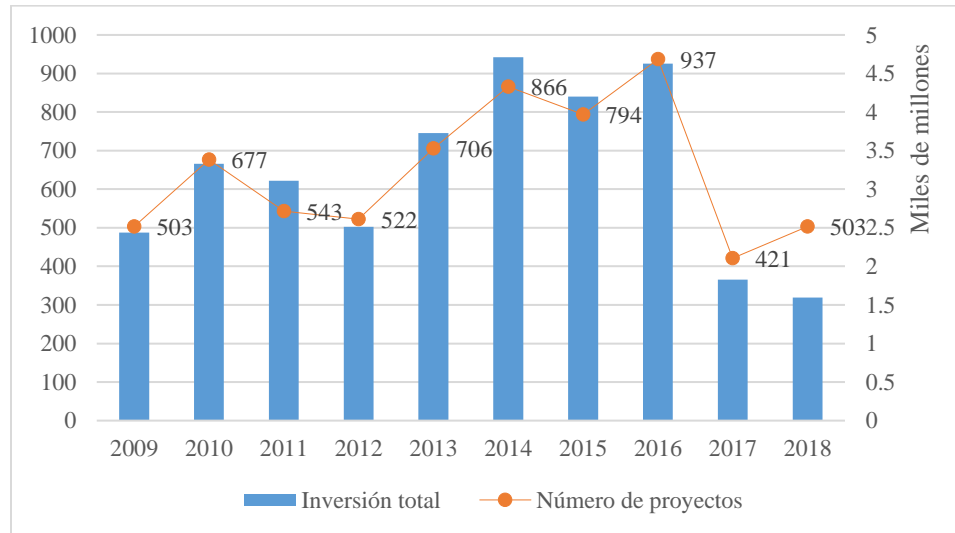
Descripción del PEI

De 2009 a 2018, el Programa de Estímulos a la Innovación fue el principal instrumento de política pública para apoyar a las empresas en la a realización del desarrollo de proyectos de investigación, desarrollo de tecnología e innovación, dirigidos al desarrollo de nuevos productos, procesos o servicios. Por cada peso invertido por el gobierno federal, los privados aportaron una cantidad similar, de conformidad con las reglas de operación de este programa de apoyos complementarios.

El objetivo general del programa era incentivar, a nivel nacional, la inversión de las empresas en actividades y proyectos relacionados con investigación, desarrollo tecnológico e innovación, de tal forma que estos apoyos tuvieran el mayor impacto posible sobre la competitividad de la economía nacional. El PEI contemplaba tres modalidades: (a) INNOVAPYME, enfocada en la innovación tecnológica para las micro, pequeñas y medianas empresas, en la cual las empresas podían presentar propuestas de manera individual o vinculada con IES, CPI o ambos. (b) INNOVATEC, focalizada en la innovación tecnológica para las grandes empresas. En esta modalidad las empresas podían presentar propuestas de manera individual o vinculada con IES, CPI o ambos. (c) PROINNOVA, destinada a proyectos en red orientados a la innovación, para propuestas y proyectos que se presentaran en vinculación con al menos dos IES, o dos CPI o uno de cada uno.

La información pública de este programa constituye la base de datos más completa a partir de la cual se puede obtener una panorámica de lo que han hecho las empresas mexicanas en materia de innovación tecnológica, de forma individual o vinculada con IES y CPI en la última década. La Gráfica 1 muestra el total de proyectos, así como los montos de inversión pública a precios de 2013. Debe recordarse que este es sólo el monto aportado por el sector público, pues para cada proyecto existió una parte proporcional contribuida por los privados.

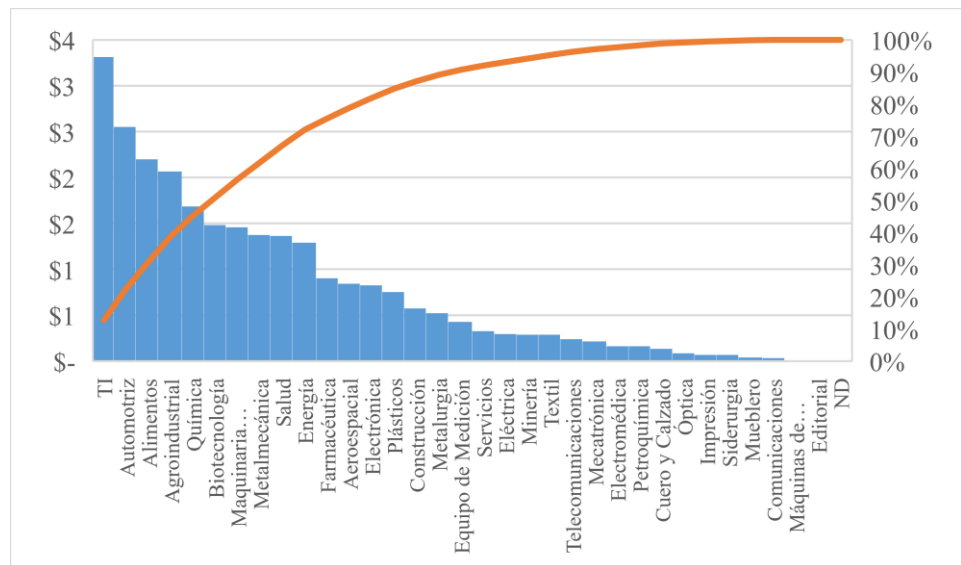
Gráfica 1. Proyectos e inversión del PEI a nivel nacional, 2009-2018



Fuente elaboración propia con base en el Padrón Público de Beneficiarios del PEI.

La Gráfica 2 evidencia que ocho sectores concentraron 62% de la inversión total: tecnologías de información, automotriz, alimentos, agroindustria, química, biotecnología, maquinaria industrial y metal mecánica. El sector salud ocupó la novena posición, representando 5% del total para el periodo de interés, mientras que el farmacéutico tuvo el 3% de la inversión.

Gráfica 2. Proyectos e inversión del PEI a nivel nacional, por sector



Fuente elaboración propia con base en el Padrón de Beneficiarios Público del PEI.

El papel de las tecnologías frente crisis sanitarias: el caso de COVID-19⁸

En cualquier tecnología puede identificarse una dimensión de desempeño que es fundamental para el segmento principal de los usuarios al que se dirige, aquí la denominaremos dimensión primaria de desempeño. Una tecnología es dominante cuando el principio en el que se fundamenta ofrece las mejores prestaciones en la dimensión primaria de desempeño (Christensen, 2015). Una tecnología es disruptiva cuando supera a la dominante en la dimensión primaria de desempeño a partir de un principio científico distinto (Kostoff et al., 2004). Por su parte, una tecnología es sostenible cuando se fundamenta en cambios incrementales de algunos de sus componentes sin apartarse del mismo principio científico (Christensen, 2015).

Las cinco tecnologías disruptivas analizadas han tenido un papel significativo en los esfuerzos para minimizar los efectos del COVID-19 en diferentes países. El Cuadro 1 muestra algunos ejemplos documentados en la literatura académica reciente. Las aplicaciones de inteligencia artificial suelen estar presentes en todas las fases del ciclo de vida de una crisis sanitaria. En las primeras fases suelen utilizarse para detectar contagios a través de métodos no convencionales; mapear o dar seguimiento a redes de contagio; gestionar de forma inteligente la

⁸ Una discusión amplia de los conceptos revisado en esta sección se encuentra en Cabrero et al., (2020)

distribución de hospitalizaciones o de vacunas; así como para dar seguimiento a las personas recuperadas (Elavarasan y Pugazhendhi, 2020).

Cuadro 1. Ejemplos de aplicaciones tecnológicas para pandemias

Tecnología Disruptiva	Aplicaciones tecnológicas	Fase en que es más común encontrarlas
Inteligencia Artificial	Técnicas rápidas de diagnóstico a partir del análisis de tomografías computarizadas del tórax mediante técnicas de Deep Learning (Elavarasan y Pugazhendhi, 2020)	Todas las fases
	Uso de medicina de precisión que utiliza modelos de inteligencia artificial para acelerar el desarrollo terapéutico de medicamentos para COVID (Zhou, et al., 2020).	
	Uso de Métodos de Deep Learning, Redes Generativas, así como Redes Neuronales de Memoria de Largo – Corto Plazo, para acelerar el proceso de diagnóstico y tratamiento del COVID-19 (Jamshidi et al., 2020)	
Nanotecnología	Nanotecnología para diseñar nano-portadores eficaces para contrarrestar las limitaciones convencionales de las terapias antivirales o biológicas (Chauhan et al., 2021)	Fase de preparación Fase de contención
	Estudios para comprender mejor las interacciones de nanopartículas sintéticas con las células en presencia de cloroquina, que pueden revelar mecanismos que están activos en las primeras etapas antes de la replicación viral (Hu et al., 2020).	
Manufactura Aditiva	Elaboración de insumos médicos, partes de equipos o equipos completos para afrontar la demanda inusual mediante impresión 3D (Attaran, 2020).	Fase de preparación Fase de contención
	Nuevos materiales desinfectantes, recubrimientos superficiales que inactiven el virus o hagan más lenta su propagación; así como para diseñar nanosensores que identifiquen de forma acelerada la infección o la respuesta inmunológica (Campos et al, 2020).	
Realidad Aumentada	Diseño de interfaces con realidad aumentada para que médicos, así como pacientes de COVID-19, puedan sobrellevar mejor las fases de hospitalización (Mantovani et al, 2020).	Fase de resolución
Biotecnología	Elaboración de vacunas de ADN que se obtienen a partir de tecnología de ADN recombinante, con utilización de técnicas de modificación genética (Calina et al, 2020).	Fase de contención Fase de resolución

Fuente: elaboración propia a partir de los autores citados

Por su parte, la nanotecnología puede ser útil de distintas formas, específicamente: para evitar la contaminación viral mediante el diseño de equipos de protección para personal de servicios de salud; para desarrollar desinfectantes antivirales eficaces, así como recubrimientos superficiales que inactiven el virus o hagan más lenta su propagación; así como para diseñar nanosensores que identifiquen de forma acelerada la infección o la respuesta inmunológica (Campos et al, 2020). En el mismo sentido, se han utilizado técnicas de manufactura aditiva para la elaboración de insumos médicos, partes de equipos o equipos completos para afrontar la demanda inusual mediante impresión 3D (Attaran, 2020). La escasa oferta de cubrebocas, caretas u otros dispositivos médicos, puede

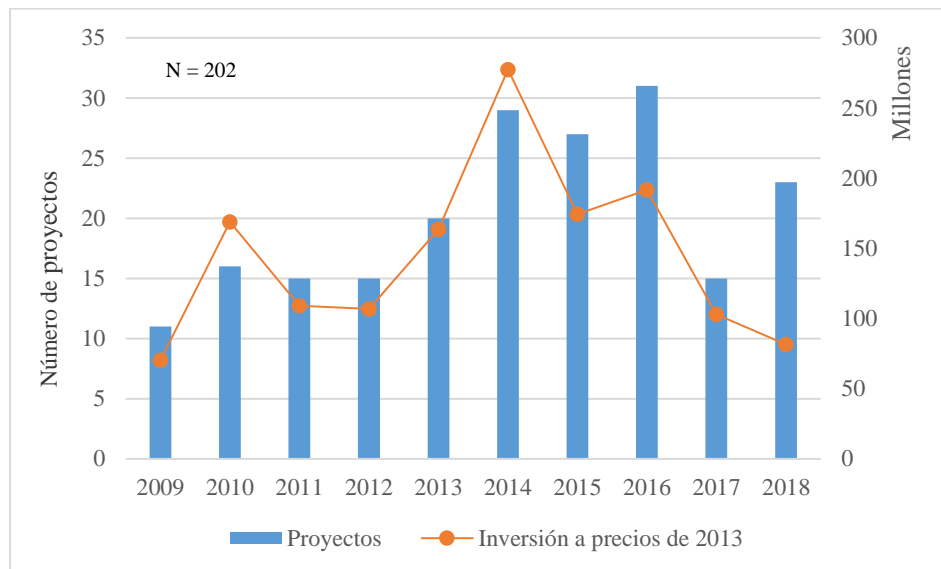
incrementarse rápidamente en el corto plazo cuando la capacidad instalada de un país o región se dedica a ello.

Existen relativamente pocos artículos sobre las aplicaciones de la realidad aumentada para el COVID - 19. Los que se han desarrollado se concentran en estudiar su uso indirecto en las fases de resolución, Algunos han documentado su uso para la reactivación económica después de las extendidas cuarentenas (Mohanty et al, 2020). Otros han estudiado el auxilio que algunas aplicaciones de esta tecnología pueden tener para que los médicos, así como pacientes de COVID-19, puedan sobrellevar mejor las fases de hospitalización (Mantovani et al, 2020).

Por último, la biotecnología predomina en la fase de resolución, debido al gran número de vacunas que se están desarrollando con base en la decodificación de genoma del virus SARS-CoV-2 (Tregoning et al, 2020; Mukherjee, 2020; Yadat et al, 2020; Badiani, 2020; Corum et al, 2020; Koirala et al, 2020). Por ejemplo, la vacuna de Pfizer - BionTech, así como la de Moderna, que se aplican en el mundo, están basadas en el uso del ARN mensajero sintético. Las vacunas de ARN proporcionan a las células las instrucciones para producir una proteína viral que induce una respuesta inmunitaria frente al agente infeccioso concreto y favorece que el organismo genere una memoria inmunitaria que lo proteja en el futuro (Livingston, 2021).

A continuación, se presenta la información analizada sobre los 202 ProTeDES encontrados en el PEI. La Gráfica 3 presenta información sobre ellos, se observa que la tendencia fue creciente de 2009 a 2016, lo que revela las crecientes aplicaciones en materia de salud, con el pico máximo de proyectos en 2016. En términos de inversión, este tipo de proyectos tuvieron inversiones crecientes, a precios de 2013, de 2009 a 2014, en este último año registraron su cifra más alta. Por su parte, en el periodo de 2015 a 2018 las inversiones destinadas a los ProTeDES se redujeron de forma sistemática. Sin embargo, en todo el periodo estudiado se invirtieron 1,504 millones de pesos en esos proyectos, lo cual permite concluir que existen antecedentes sólidos para construir CaTES que permitan minimizar los efectos de este tipo de crisis en el futuro.

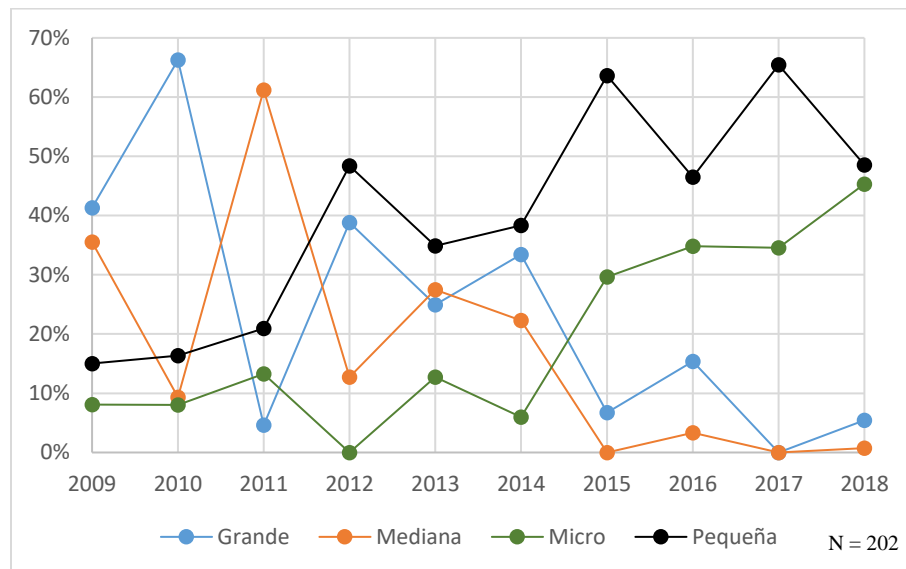
Gráfica 3. ProTeDES, total de proyectos y montos de inversión (precios de 2013), tecnologías disruptivas, 2009-2018



Fuente: elaboración propia a partir del padrón de beneficiarios del PEI 2009-2018

Se encuentra que empresas de todos los tamaños, salvo las micro que registraron una participación marginal, tuvieron ProTeDES en 2009. Pero con el transcurso de los años, las microempresas incrementaron su participación notablemente hasta llegar a 45%. Las empresas pequeñas también tuvieron un papel destacado al pasar de 15% a 49% en el periodo estudiado. Lo opuesto ocurrió con las empresas grandes que pasaron de 41% en 2009 a 5% en 2018. Una explicación detrás de estas cifras es la creciente importancia de startups tecnológicas en el sector salud en México.

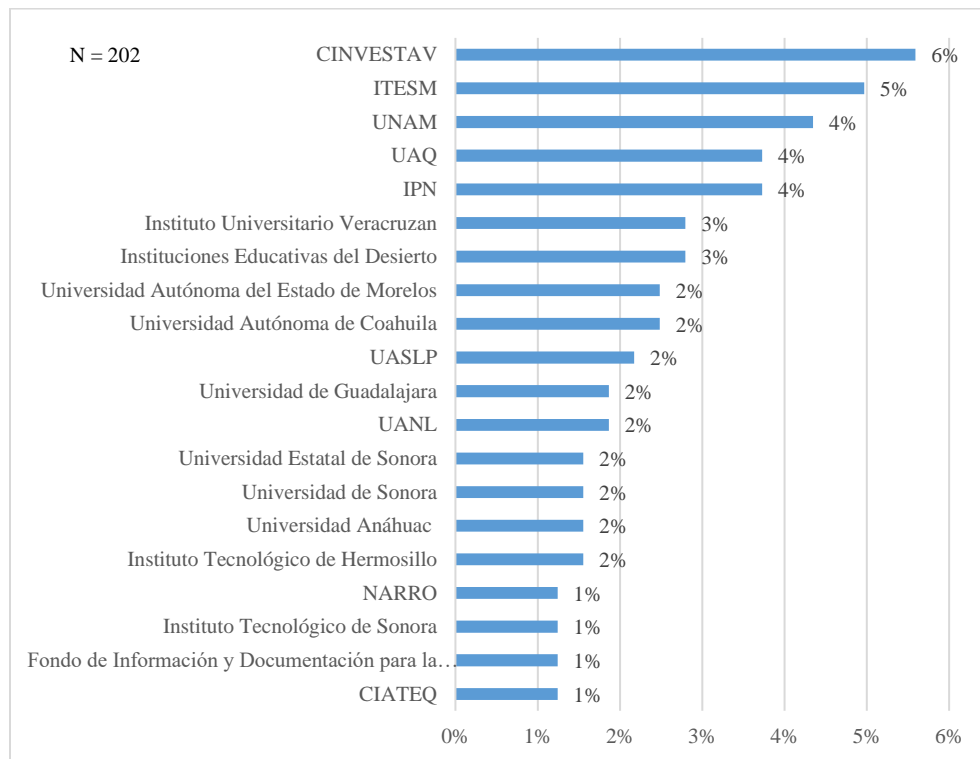
Gráfica 4. ProTeDES, por tamaño de empresa, tecnologías disruptivas, 2009-2018



Fuente: elaboración propia a partir del padrón de beneficiarios del PEI 2009-2018

La innovación tecnológica tiene más probabilidades de emerger en entornos de alta colaboración en los que la academia e industria suman esfuerzos. En el caso de los ProTeDES identificados, se encontró que más de 88% de los proyectos se realizaron en alianza con CPI e IES. Estos deben ser considerados actores clave del proceso de construcción y consolidación del SINAES, por el conocimiento acumulado que poseen y que puede reutilizarse en un futuro próximo. Sólo una veintena de estas instituciones reúnen la mitad del total de vinculaciones público-privadas que existieron en los ProTeDES (Gráfica 5). Debe recordarse que en un mismo proyecto podían colaborar varias de estas instituciones académicas, de hecho, en algunos ProTeDES sumaron esfuerzos hasta cuatro de ellas.

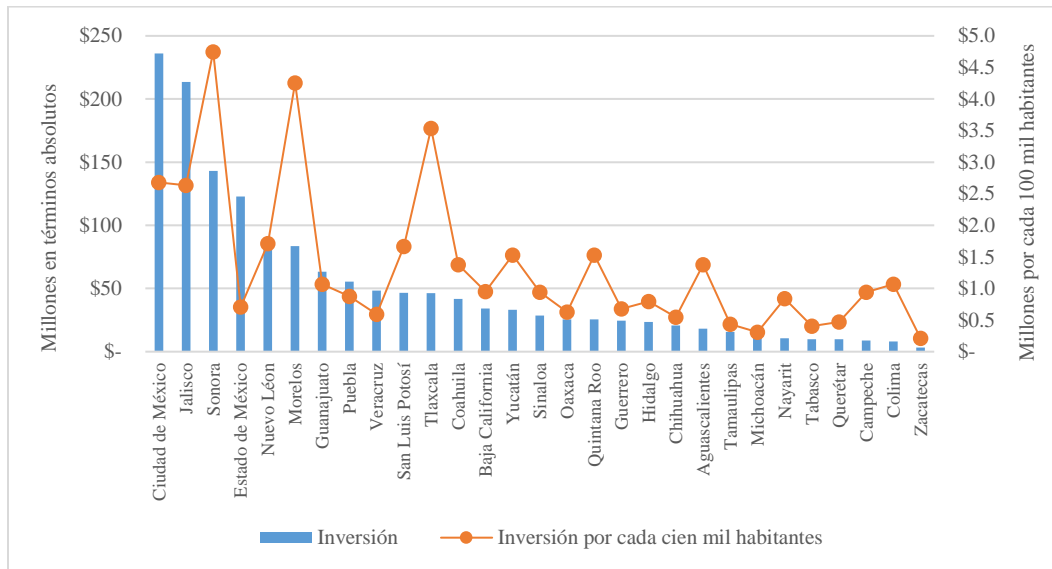
Gráfica 5. Principales aliados de las empresas privadas para el desarrollo de tecnologías disruptivas para emergencias sanitarias



Fuente: elaboración propia a partir del padrón de beneficiarios del PEI 2009-2018

Por entidad federativa, la mayoría de la inversión en ProTeDES se desarrollaron en la Ciudad de México, Jalisco, Sonora, Estado de México y Nuevo León. Pero las posiciones cambian al hacer el análisis por cada 100 mil habitantes, pues en este caso los primeros lugares son: Sonora, Morelos, Tlaxcala, Ciudad de México y Jalisco (Gráfica 6).

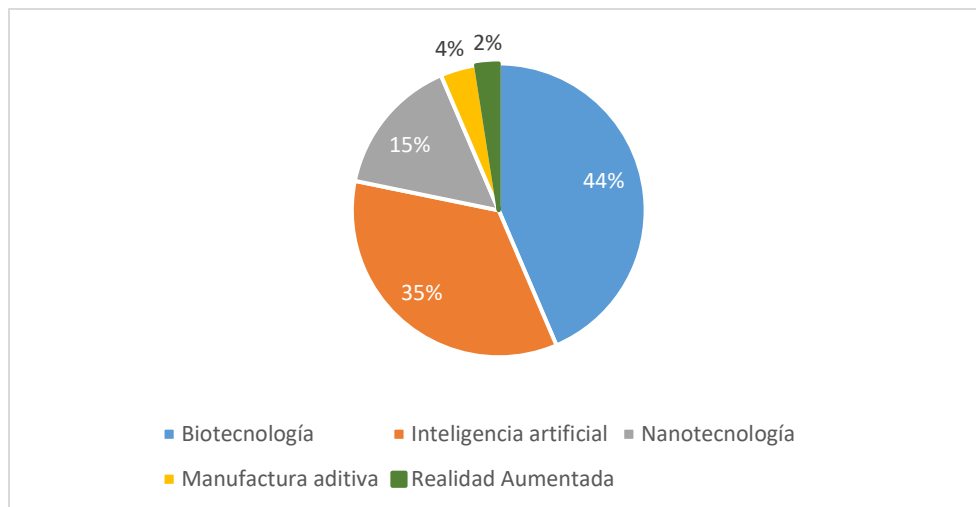
Gráfica 6. ProTeDES por entidad federativa en número absolutos - por cada 100 mil habitantes (2009-2018)



Fuente: elaboración propia a partir del padrón de beneficiarios del PEI 2009-2018

Al realizar el análisis por tipo de tecnología, se observa que las dos tecnologías disruptivas más relacionadas con emergencias sanitarias son la biotecnología e inteligencia artificial (reúnen 79% del total); mientras que la nanotecnología tiene un papel intermedio; y, finalmente, con presencia mínima aparecen la manufactura aditiva y realidad aumentada (Gráfica 7).

Gráfica 7. Presencia de tecnologías disruptivas relacionadas con emergencias sanitarias por tipo de tecnología



Fuente: elaboración propia a partir del padrón de beneficiarios del PEI 2009-2018

Por su parte, el Cuadro 3 muestra evidencia de que en todas las tecnologías sobresalen prácticamente las mismas entidades federativas. Esta información es importante porque confirma que una estrategia para generar más ProTeDES tendría que focalizarse para aprovechar al máximo la experiencia disponible.

Cuadro 3. Principales entidades por el número de ProTeDES

Tecnología	Entidades
BIO	Ciudad de México (24%), Jalisco (13%), Baja California (8%), Morelos (7%) y Nuevo León (7%).
IA	Ciudad de México (11%), Guanajuato (10%), Jalisco (10%), Sonora (9%), Veracruz (7%).
NANO	Ciudad de México (19%), Hidalgo (13%), Estado de México (10%), Baja California (6%) y Quintana Roo (6%).
MA	Jalisco (38%), Ciudad de México (13%), Coahuila (13%), Morelos (13%) y Puebla (13%).
RA	Aguascalientes (20%), Jalisco (20%), Morelos (20%), Nuevo León (20%) y Sonora (20%).

Fuente: elaboración propia a partir del padrón de beneficiarios del PEI 2009-2018

A continuación, se describen aplicaciones específicas que guardan alguna similitud con otras que se han realizado en varias partes del mundo. Por ejemplo, la inteligencia artificial ha sido una de las tecnologías disruptivas más socorrida en el mundo para afrontar la pandemia por COVID-19 (Elavarasan y Pugazhendhi, 2020; Wang et al, 2020b; Xiangao, 2020; Lin et al, 2020; Hu et al, 2020; Srinivasa y Vázquez; 2020). En México, la empresa MAKE MORE, en la Ciudad de México, desarrolló un algoritmo para clasificar electrocardiogramas para detección de enfermedades cardiovasculares a partir de técnicas de *machine learning*, lo anterior en conjunto con el Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación (INFOTEC). Esto es cercano a la propuesta de Wang et al, (2020b) quien desarrolló un diagnóstico clínico para COVID-19 basado en cambios radiográficos en imágenes de tomografías computarizadas mediante el método de *deep learning*, con una precisión de evaluación interna de 89.5% y de 85.2% de validación externa en Taiwán.

Es importante señalar que los algoritmos de inteligencia artificial requieren una enorme cantidad de información para realizar cálculos, predicciones o encontrar patrones no evidentes. Esto significa que mientras no se implemente un sistema nacional de expediente médico electrónico, el potencial que pueden ofrecer estas nuevas tecnologías es limitado. Un desarrollo tecnológico que podría ser útil y que se encuentra en el padrón del mismo programa es la Plataforma Digital de Salud

para la Creación del Expediente Médico Electrónico en Yucatán, por parte de la empresa SISTEMAS TECNOLÓGICOS J2.

Las tecnologías de realidad aumentada han sido menos usadas para generar soluciones en la gestión de emergencias sanitarias. Sin embargo, existen experiencias cercanas como el Prototipo portátil de realidad aumentada y virtual para pacientes pediátricos oncológicos hospitalizados, desarrollado en Morelos, por la empresa PROPASOL, en conjunto con la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y la Universidad Tecnológica del Sur del Estado de Morelos. Un desarrollo similar se realizó en la misma entidad federativa para generar plataformas tecnológicas para interfaces humano máquina en sistemas embebidos por RUBIO PHARMA Y ASOCIADOS SA DE CV, en conjunto con el CICY, el CIAD, así como el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).

Algunas vacunas son creadas por ingeniería genética e intentan enseñar al cuerpo a reconocer algunas proteínas del coronavirus, a través de un adenovirus específico. Actualmente existen algunas en desarrollo (Calina et al, 2020). Tal es el caso de la vacuna de Pfizer - BioNTech que se distribuye en todo el mundo, así como de la de mayoría de las que se encuentran en distintas fases de desarrollo. En México ya se han generado esfuerzos para otras infecciones, por ejemplo, existe un proyecto de identificación y clasificación de cepas del virus de influenza aviar en México, aplicando métodos de biología molecular para generar una vacuna mejorada. Este proyecto fue desarrollado por la empresa INSTRUMENTOS Y ACCESORIOS AUTOMATIZADOS SA DE CV, en conjunto con el Instituto Tecnológico de Sonora. Otro ejemplo es el desarrollo de una vacuna deleteada viva, así como un kit de diagnóstico para diferenciar anticuerpos de campo de anticuerpos vacunales de PRRS, que fue llevada a cabo por NATRIUM DE MEXICO SA DE CV, en vinculación con el IPICYT, así como con la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Otro proyecto interesante identificado es la incorporación de nanopartículas de plata a materiales de uso hospitalario para disminuir las infecciones nosocomiales, que llevó a cabo la empresa NANOSOLUCIONES en Coahuila, en conjunto con el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) y la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC). Esto se aproxima a lo que estudió Sarkar (2020), quien propuso protocolos de tratamiento experimentales basados en coloides de nano-plata mediante administración por inhalación. El autor afirma que este tratamiento podría ser útil como una intervención de primera línea en etapas tempranas, cuando las afectaciones se concentran en el sistema respiratorio superior. Por ejemplo, las formulaciones propuestas podrían usarse para controlar los brotes

locales de COVID-19 a través del tratamiento domiciliario en etapa temprana (Sarkar, 2020).

En líneas de investigación relacionadas, se encuentra el desarrollo de un nanocompuesto polimérico basado en nanopartículas metálicas y cerámicas con propiedades antibacterianas para uso en enseres domésticos, de la empresa NANOMAT de Nuevo León, con el CIMAV y el CIQA.

Otro ProTeDES interesante es el desarrollo de impresora tridimensional, inteligente, autónoma, de alta precisión con tecnología IoT en Jalisco, por la empresa COLIBRI 3D. Otro caso, aunque no es un proyecto del PEI es la iniciativa del Consorcio de Manufactura Aditiva⁹, que inició operaciones en 2018, e implementó una iniciativa en respuesta a la pandemia de COVID-19. Específicamente, se gestiona una librería de piezas o productos que pueden ser producidos por donadores para proveer a entidades de salud.

Desafíos organizacionales para la conformación de un Sistema Inteligente Nacional de Atención a Emergencias Sanitarias (SINAES) en México

Las situaciones de crisis, como ha sido el caso de la pandemia de COVID-19, someten a los países y a los gobiernos a desplegar en muy poco tiempo soluciones, estrategias, e infraestructura para contener los efectos negativos de la crisis. La capacidad de gestión de crisis es una cualidad que deben incorporar los gobiernos en el diseño de sus organizaciones, así como en sus estrategias de reacción oportuna. Sin información de las capacidades potenciales reales de un país o de una región, difícilmente se puede hacer frente a este tipo de situaciones.

En este artículo se presenta un análisis amplio de las capacidades tecnológicas que empresas, centros de investigación y universidades, han mostrado en la última década para innovar y desarrollar productos y procesos en el sector sanitario de país. Sin duda, identificar las regiones, las instituciones y empresas, que tienen el conocimiento y el potencial tecnológico para hacer frente a emergencias sanitarias, como se hace en este ejercicio, es una labor que tanto el gobierno federal como los gobiernos estatales o municipales deberían llevar a cabo sistemáticamente como parte de las actividades de previsión en el marco de un Plan de Manejo de Crisis.

Como se observa a lo largo del análisis, a pesar de los esfuerzos y desarrollos encontrados, no es posible afirmar que en este momento existan en México

⁹ La información sobre el Consorcio puede consultarse en: <http://lisma.com.mx/>. La información sobre la plataforma para COVID puede consultarse en <https://aditiva.site/#/>.

capacidades tecnológicas disponibles y suficientes para contribuir decisivamente en la batalla contra pandemia como COVID-19 o similares. En realidad, casi en ninguna parte del mundo se logró utilizarlas en su máximo potencial, sino que fueron retomadas como herramientas complementarias en fases experimentales.

Sin embargo, como también se ha identificado en el análisis, sí hay redes de empresas e instituciones que potencialmente podrían desplegar sus capacidades ante una contingencia sanitaria. Además, esta no será la última emergencia sanitaria que el mundo y México enfrentarán en los años por venir. La estrecha interconexión económica global hace que ningún país pueda sustraerse de este tipo de riesgos. Los esfuerzos que se han realizado en nuestro país por desarrollar tecnología para el campo de salud, específicamente para epidemias o pandemias, son cruciales, aunque hasta ahora se hayan desarrollado de forma desconectada, sin formar parte de ninguna estrategia nacional.

Tres estrategias se vuelven importantes en este tema. Primero, retomar el programa de apoyos a la innovación y el desarrollo tecnológico focalizando una parte de los incentivos en estos temas y en este sector. Segundo, construir una red de colaboración entre empresas, centros de investigación, instituciones de investigación superior, investigaciones y gobierno para mantener fortalecer la investigación en estos temas. Y, tercero, desarrollar estrategias de formación de capital humano de alto nivel en estas tecnologías con un énfasis particular en su aplicación al sector salud.

Esto permitirá establecer los cimientos para construir un SINAES, capaz de ofrecer soluciones innovadoras a las complejas enfermedades que en el futuro sin duda azotarán a la humanidad. No obstante, un sistema de este tipo enfrenta un dilema pues está fundamentado en un conjunto de tecnologías descentralizadas que captan información a través de dispositivos como celulares, sensores, tabletas, relojes inteligentes o algoritmos que operan de forma independiente a través de la red. Esta descentralización permite una cobertura casi total de los potenciales riesgos que enfrenta una población en materia sanitaria, siempre que todos los usuarios estén dispuestos a que sus dispositivos funcionen de esta manera, pues una gran parte de estos son privados. Esto significa que el SINAES no puede funcionar sin un acuerdo político sobre el tipo de datos e información por recabar, para asegurar un mínimo de legitimidad e interoperabilidad.

Por tal motivo, un SINAES debe estar constituido como una organización flexible que permite la interacción con una cantidad infinita de dispositivos, al mismo tiempo que logra construir mecanismos para lograr legitimidad, es decir, para

acordar el tipo de datos, información u objetivos digitales recabados. Este no es un proceso meramente técnico, pues detrás de estos criterios existen preferencias de política pública distintas. Por ejemplo, la plataforma de Google Maps fue utilizada durante la pandemia por COVID-19, para dar seguimiento a la movilidad de los habitantes de distintas ciudades del país¹⁰. La política privilegiada era la de la reducción de la movilidad, así como de aislamiento.

En contraste, los sistemas de detección rápida de la infección, basados en inteligencia artificial, aglutinan grandes cúmulos de información para analizarla con un objetivo distinto: facilitar la movilidad segura en espacios laborales o comerciales. Si no existe un mecanismo político para asegurar la legitimidad de la información por recabar, la descentralización impedirá que la organización en la que descansa el SINAES pueda sacar el máximo provecho de los recursos destinados a la construcción de este sistema.

Es crucial que se inicie la discusión para constituir un sistema de este tipo, así como los desafíos organizacionales que implica su desarrollo. Es probable que millones de vidas dependan de ello. México deberá estar mejor preparado en este esfuerzo.

Referencias

- Augustine, N. R. (2000). *Managing the Crisis You Tried to Prevent*. Harvard Business Review on Crisis Management, Harvard Press, Boston
- Attaran, M. (2020). 3D Printing Role in Filling the Critical Gap in the Medical Supply Chain during COVID-19 Pandemic. *American Journal of Industrial and Business Management*, 10(05), 988-1001. doi:10.4236/ajibm.2020.105066
- Badiani, A. A., Patel, J. A., Ziolkowski, K., & Nielsen, F. B. H. (2020). Pfizer: The miracle vaccine for COVID-19?. *Public Health in Practice*, 1, 100061.
- Batarseh, F., Gopinath, M., & Monken, A. (2020). *Artificial Intelligence Methods for Evaluating Global Trade Flows*. FRB International Finance Discussion Paper, (1296).
- Cabrero Mendoza, E., Carreón Rodríguez, V.G. y Guajardo Mendoza, M.A. (2021). México frente a la sociedad del conocimiento. La difícil transición. Siglo XXI/CIDE.

¹⁰ Ver la información en: <https://www.poblanerias.com/2020/11/google-maps-reporta-disminucion-en-la-movilidad-por-pandemia-en-mexico/>

- Calina, D., Docea, A. O., Petrakis, D., Egorov, A. M., Ishmukhametov, A. A., Gabibov, A. G., ... & Spandidos, D. A. (2020). Towards effective COVID 19 vaccines: Updates, perspectives, and challenges. *International Journal of Molecular Medicine*, 46(1), 3-16.
- Campos, E. V., Pereira, A. E., De Oliveira, J. L., Carvalho, L. B., Guilger-Casagrande, M., De Lima, R., & Fraceto, L. F. (2020). How can nanotechnology help to combat COVID-19? Opportunities and urgent need. *Journal of Nanobiotechnology*, 18(1), 1-23.
- Chauhan, G., Madou, M. J., Kalra, S., Chopra, V., Ghosh, D., & Martinez-Chapa, S. O. (2020). Nanotechnology for COVID-19: therapeutics and vaccine research. *ACS nano*, 14(7), 7760-7782.
- Christensen, C. M., Raynor, M. E., & McDonald, R. (2015). What is disruptive innovation. *Harvard Business Review*, 93(12), 44-53.
- Corum, J., Grady, D., Wee, S. L., & Zimmer, C. (2020). Coronavirus vaccine tracker. *The New York Times*, 5.
- Devlin, E. (2007). *Crisis Management Planning and Execution*, Auerbach Publications. Boca Raton.
- Elavarasan, R. M., & Pugazhendhi, R. (2020). Restructured society and environment: A review on potential technological strategies to control the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 138858.
- Fink, S. (1986). *Crisis Management. Planning for the Inevitable*. American Management Association, New York.
- Hu, Z., Ge, Q., Jin, L., & Xiong, M. (2020). Artificial intelligence forecasting of covid-19 in china. *arXiv preprint arXiv:2002.07112*.
- Jamshidi, M., Lalbakhsh, A., Talla, J., Peroutka, Z., Hadjilooei, F., Lalbakhsh, P., ... & Mohyuddin, W. (2020). Artificial intelligence and COVID-19: deep learning approaches for diagnosis and treatment. *IEEE Access*, 8, 109581-109595.
- Jiang, X., Coffee, M., Bari, A., Wang, J., Jiang, X., et al., 2020. Towards an artificial intelligence framework for data-driven prediction of coronavirus clinical severity. *CMC Computers, Materials & Continua*. 63, 537-551. <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.010691>.
- Kamalasan, Kaladhar (2020). Biomimetic Conjoining Pathways for COVID-19 Nanomedicine Drug Discovery and Medical Devices: Prophylactic Medicines as Alternatives for Vaccines. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, 34 (S1), 8-11.

- Koirala, A., Joo, Y. J., Khatami, A., Chiu, C., & Britton, P. N. (2020). Vaccines for COVID-19: The current state of play. *Paediatric respiratory reviews*, 35, 43-49.
- Kostoff, R. N., Boylan, R., & Simons, G. R. (2004). Disruptive technology roadmaps. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(1-2), 141-159.
- Lee, J. A. (2020). *Artificial Neural Networks in Public Policy: Towards an Analytical Framework* (Doctoral dissertation).
- Li, L., Qin, L., Xu, Z., Yin, Y., Wang, X., Kong, B., ... & Cao, K. (2020). Artificial intelligence distinguishes COVID-19 from community acquired pneumonia on chest CT. *Radiology*, 200905.
- Livingston, E. H. (2021). Necessity of 2 Doses of the Pfizer and Moderna COVID-19 Vaccines. *JAMA*.
- Mantovani, E., Zucchella, C., Bottiroli, S., Federico, A., Giugno, R., Sandrini, G., ... & Tamburin, S. (2020). Telemedicine and virtual reality for cognitive rehabilitation: a roadmap for the COVID-19 pandemic. *Frontiers in neurology*, 11.
- Mena Marco (2011) *Gestión de crisis*. Siglo XXI Editores, 2011.
- Mohanty, P., Hassan, A., & Ekis, E. (2020). Augmented reality for relaunching tourism post-COVID-19: socially distant, virtually connected. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*.
- Mukherjee, R. (2020). Global efforts on vaccines for COVID-19: Since, sooner or later, we all will catch the coronavirus. *Journal of Biosciences*, 45, 1-10.
- Pearson, Ch. y Clair, J. (1998). *Reframing Crisis Management*. Academy of Management Review.
- Perrow, Ch. (1984). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. Basic Books, New York.
- Sarkar, D. S. (2020). Silver Nanoparticles with Bronchodilators Through Nebulisation to Treat COVID 19 Patients. *Journal of Current Medical Research and Opinion*, 3(04), 449-450. doi:10.15520/jcmro.v3i04.276.
- Savaget, P., Chiarini, T., & Evans, S. (2019). Empowering political participation through artificial intelligence. *Science and Public Policy*, 46(3), 369-380.
- Schwab, P., Linhardt, L., & Karlen, W. (2018). Perfect match: A simple method for learning representations for counterfactual inference with neural networks. arXiv preprint arXiv:1810.00656.

- Srinivasa Rao, A. S., & Vazquez, J. A. (2020). Identification of COVID-19 can be quicker through artificial intelligence framework using a mobile phone-based survey when cities and towns are under quarantine.
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. arXiv preprint arXiv:1906.02243.
- Thierer, A. D., Castillo O'Sullivan, A., & Russell, R. (2017). Artificial intelligence and public policy. Mercatus Research Paper.
- Tregoning, J. S., Brown, E. S., Cheeseman, H. M., Flight, K. E., Higham, S. L., Lemm, N. M., ... & Pollock, K. M. (2020). Vaccines for COVID-19. *Clinical & Experimental Immunology*, 202(2), 162-192.
- Ulrich B, & Rey, J. A. (2002). *La sociedad del riesgo global*. Madrid: Siglo Veintiuno.
- Wang, C. J., Ng, C. Y., & Brook, R. H. (2020). Response to COVID-19 in Taiwan: big data analytics, new technology, and proactive testing. *Jama*, 323(14), 1341-1342.
- Xiangao, J., Coffee, M., Bari, A., Wang, J., Jiang, X., Huang, J., . . . Huang, Y. (2020). Towards an Artificial Intelligence Framework for Data-Driven Prediction of Coronavirus Clinical Severity. *Computers, Materials & Continua*, 62(3), 537-551. doi:10.32604/cmc.2020.010691
- Yadav, T., Srivastava, N., Mishra, G., Dhama, K., Kumar, S., Puri, B., & Saxena, S. K. (2020). Recombinant vaccines for COVID-19. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 1-8.
- Yuan, M., Yin, W., Tao, Z., Tan, W., Hu, Y., 2020. Association of radiologic findings with mortality of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *PLoS One* 15, e0230548. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230548>.