

## Gestión tecnológica e innovación en el análisis de la calidad del agua superficial: Desafíos y oportunidades para México

---

**Autores:** Santana Quintero, Talía\*; Salazar Salazar, Kristian

**Contacto:** \*[sqtsweet@hotmail.com](mailto:sqtsweet@hotmail.com)

**País:** México

### Resumen

Esta investigación aborda la gestión tecnológica e innovación en las tareas de monitoreo y evaluación de la calidad del agua superficial de México; tema de gran importancia debido a su impacto en la salud humana, la economía, y el ambiente a nivel mundial. Se discuten la eficacia en la detección de contaminantes y la evaluación de la calidad del recurso hídrico.

La gestión tecnológica y la innovación integran el marco teórico que permite analizar la trayectoria de acumulación de capacidad tecnológica del sector del agua enfocada en el monitoreo y evaluación de la calidad del líquido, así como los criterios y parámetros que definen la calidad, y los valores límite de los parámetros presentes en el agua que son establecidos dentro de las regulaciones ambientales. En este trabajo se realiza una discusión de las tecnologías emergentes y se analiza su efectividad en el análisis de la calidad del agua. Además, se discuten los avances en la gestión de datos y la integración de tecnologías de la información en la gestión del recurso hídrico.

En este estudio se destaca que el análisis de la calidad del agua superficial es un tema crítico que requiere de un enfoque multidisciplinario para abordar los desafíos de la contaminación del recurso. La buena calidad del agua es esencial para garantizar la salud humana, la economía y la sostenibilidad de los ecosistemas, y requiere de un esfuerzo conjunto y coordinado de todos los actores involucrados en su gestión. Bajo un análisis de los desafíos y oportunidades que enfrenta la gestión de la calidad del agua superficial, se discuten los principales problemas de contaminación, como la producida por productos químicos, la microbiológica y la contaminación por nutrientes, y se describen las medidas que se están implementando para abordar estos problemas con un enfoque de gestión tecnológica.

De manera conclusiva, se presentan algunas recomendaciones para mejorar la gestión de la calidad del agua superficial, incluyendo la necesidad de mejorar la coordinación entre las partes interesadas, la implementación de tecnologías avanzadas para el monitoreo, y la promoción de prácticas de gestión sostenible del agua.

### 1. Introducción

El elemento más importante para la alimentación y la agricultura es el agua, un recurso renovable utilizado por los seres humanos y los ecosistemas para su supervivencia. Se puede encontrar en cuerpos de agua naturales como ríos, lagos, arroyos, lagunas, manantiales y acuíferos subterráneos, así como en gotas de lluvia y almacenada en forma de hielo y nieve en los glaciares y las capas de hielo. En México se estima que anualmente 350 km<sup>3</sup> de agua escurren a través de ríos y arroyos, mientras que 91 km<sup>3</sup> se infiltra al subsuelo de forma natural para recargar los acuíferos calculados en 150 km<sup>3</sup> de agua subterránea, lo que da un estimado de recursos hídricos internos renovables anuales de 490 km<sup>3</sup> (AQUASTAT, 2023). Sin embargo, este recurso está repartido en su nacimiento de forma desigual en el territorio mexicano, ya que el 50% del

escurrimiento superficial se genera en el sureste, en tan sólo 20% del territorio; mientras que, en el norte del país, un 30% del territorio genera solo el 4% del escurrimiento.

En el 2000 se detectaron problemas de sobre explotación en el 17% de los acuíferos ubicados principalmente en las regiones noroeste, norte y centro-oeste de México. Desde entonces, esta situación ha experimentado un constante aumento, llegando a registrarse una sobreexplotación mayor al 24% en los últimos 20 años en los 653 acuíferos evaluados (CONAGUA, 2023). Cabe destacar que, dentro de esta sobreexplotación, se ha registrado una extracción hídrica nacional de 80.3 km<sup>3</sup>, donde el 60.8% del agua utilizada para fines consuntivos proviene de fuentes superficiales como ríos, arroyos, lagos y presas, mientras que el resto corresponde a aguas subterráneas. Del total del volumen concesionado para usos agrupados consuntivos, al 2021 el 75.7% le correspondía al agrícola. Esta información resalta la necesidad de abordar de manera integral la gestión de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos en el país.

La calidad del agua no solo se ve afectada por el uso y consumo humano, sino también por los impactos ambientales que distintos elementos como los metales que, al no ser biodegradables, generan en el entorno. Los metales presentes en el agua representan un problema que requiere soluciones a mediano plazo (Ding et al., 2019; Liang et al., 2011; Tripodi et al., 2022). La concentración de metales en los cuerpos de agua está influenciada por diversos factores, como el suelo, el clima, la topografía, la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno y la presencia de sólidos (Islam et al., 2015; Lintern et al., 2018; Lyman, 1995; Su et al., 2013). En el caso de México, la calidad del agua es de especial atención, ya que está directamente relacionada con la salud y la seguridad de más de 126,705,138 personas, así como con la integridad de los ecosistemas que abarcan más de 1.96 millones de km<sup>2</sup> en el país (INEGI, 2023).

Por lo que, comprender los procesos de aprendizaje y acumulación de capacidad tecnológica que tiene el sector del agua para poder establecer dinámicas de monitoreo y medición en la calidad del recurso se convierte un tema relevante en términos de gestión tecnológica. En los últimos 20 años los monitoreos y mediciones han tenido cambios en sus procesos de aprendizaje, que han ido desde la medición manual a el uso de tecnologías avanzadas. El análisis de las capacidades tecnológicas permite analizar la acumulación tecnológica del sector e identificar los procesos tecnológicos actuales que vistos desde la gestión darán una perspectiva de los desafíos y oportunidades para monitorear la calidad del agua.

El crecimiento poblacional actual en México ha generado un aumento en la demanda de agua limpia para diversos usos en diferentes sectores. La intensificación de la agricultura, la industrialización, la urbanización y la extracción han contribuido al deterioro de la calidad del recurso hídrico (Biswas y Tortajada, 2018; Sinha et al., 2017). Estos cambios representan un desafío para garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, como lo establece el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible de las Naciones Unidas (ONU, 2015).

Los estudios han centrado sus análisis en la escasez o estrés hídrico (Schewe et al., 2014; Liu et al., 2017; Cui et al., 2018; Kummu et al., 2016; Vanham et al., 2018). Sin embargo, es esencial conocer las condiciones de la calidad del agua debido a sus graves consecuencias en la salud humana (Michelle et al., 2021). La forma para medir la calidad del agua es evaluando sus características químicas, físicas y biológicas en relación con su calidad natural, así como los efectos en los seres humanos y los posibles usos.

Este trabajo está basado en el estudio del sector y está organizado en cinco partes. La segunda parte presenta la revisión de literatura sobre las capacidades tecnológicas que tiene México para la medición de la calidad del agua (gestión tecnológica), y se describe el enfoque analítico para capturar la innovación de

las tecnologías y, su aplicación al problema generalizado del agua. La tercera parte presenta la metodología utilizada para este trabajo. Por su parte, en la cuarta sección se analiza la trayectoria de acumulación de capacidad tecnológica de las capacidades del sector. Finalmente, concluimos con la discusión de nuestros hallazgos y sus implicaciones para la eficacia en la detección de contaminantes y la evaluación de la calidad del recurso hídrico.

## 2. Gestión tecnológica, capacidades tecnológicas

La gestión adecuada de conocimientos y habilidades que lleven a los sectores a la creación de herramientas, que ayuden a la adquisición del conocimiento en cada una de las etapas del crecimiento de una organización, permite identificar y utilizar en su favor cualquier tipo de circunstancia de mercado a enfrentar. Bajo este enfoque, el aprovechamiento de las capacidades internas o externas de los sectores permite dirigir los recursos disponibles con el objetivo de generar ideas, crear nuevos conocimientos, mejorarlos o transferirlos. Dentro de la gestión tecnológica autores como Schumpeter (1942), Solow (1956), Arrow (1962) y Pasinetti (1983) sostienen que, a través de la adopción e incorporación de nuevas técnicas y procesos productivos, una economía puede alcanzar niveles superiores de crecimiento e incluso crecimiento sostenido de largo plazo.

La gestión tecnológica juega un papel crucial en el manejo del cambio tecnológico, este cambio permite identificar el impacto significativo de los avances, innovaciones o cambios de tecnologías, métodos o procesos de una organización, industria o sociedad en general. El análisis de las tecnologías existentes y pasadas es de gran utilidad en la interpretación de resultados, sobre todo en la proyección para conocer las posibles tecnologías a utilizar en un objetivo en particular. Para ello, en este trabajo el análisis del cambio tecnológico es el marco conceptual para analizar los procesos de acumulación de capacidades tecnológicas de las empresas que forman parte de los estudios en la calidad del agua en México.

Al plasmar las capacidades tecnológicas para el problema de medición de la calidad del agua se pueden recoger los avances del conocimiento en el área y caracterizar los procesos de acumulación cognitiva tecnológica, al mismo tiempo que se redefinen actividades propias del sector. Bell y Pavitt (1995) argumentan que la estructura de una industria influye en el tipo de innovación que predominará en ella. La innovación basada en el conocimiento tecnológico acumulado (KBI), por otro lado, se basa en la experiencia acumulada y el conocimiento tácito en una industria en particular. Enfocándose en mejorar los procesos existentes y hacer mejor uso de los recursos disponibles; por lo que utilizar el análisis de capacidades tecnológicas permite visualizar los desafíos y oportunidades para el desarrollo sostenible.

## 3. Metodología

En este trabajo se examina la construcción de las capacidades tecnológicas detonadas en el sector del agua mediante la identificación en del uso de tecnologías para medir la calidad del recurso e identificar las empresas involucradas. Se utiliza la taxonomía de Bell y Pavitt (1995) que define el diseño de capacidades tecnológicas; sin embargo, se analizan los avances del conocimiento en esta área con las adaptaciones realizadas por Figuereido (2004).

El análisis agrupa las principales capacidades tecnológicas según el grado de innovación, y se define uno de los cuatro niveles de acumulación: 1) nivel de capacidades tecnológicas de producción rutinaria, 2) nivel básico, 3) nivel intermedio y 4) nivel avanzado. Con respecto a sus columnas, la taxonomía distingue las funciones técnicas en las que las empresas pueden desarrollar capacidades tecnológicas. Son tres grupos de dichas funciones: (i) funciones de inversión que se refieren a la creación de cambios técnicos, y la admi-

nistración de su implementación durante grandes proyectos de inversión; (ii) funciones de producción que se refieren a la generación y gestión del cambio técnico en los procesos, la organización productiva y los productos; y (iii) funciones de apoyo que consisten en el desarrollo de vínculos e interacciones necesarias para la actividad innovadora.

#### 4. Trayectoria de acumulación de capacidad tecnológica de las capacidades del sector

Con base en el marco teórico definido anteriormente, en esta sección se analiza la trayectoria de acumulación de capacidad tecnológica del sector enfocada en análisis de la calidad del agua en México. A partir del análisis histórico, productivo, tecnológico y de la estructura se han identificado cuatro etapas de evolución de tecnologías aplicadas para el análisis de la calidad del agua (Tabla 1).

**TABLA 1. Principales características del proceso de acumulación de las tecnologías para el análisis de la calidad del agua**

Etapa I. Medición manual in situ	Etapa II. Uso de tecnología electrónica	Etapa III. Tecnología 4.0
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montaje sencillo de componentes</li> <li>• Recolección de muestras de agua en cuerpos pequeños</li> <li>• Química básica de procesos</li> <li>• Vínculos mínimos con el contexto local o tecnológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montaje medio de componentes</li> <li>• Dispositivos electrónicos especializados (sensores, que se instalan en el agua para medir parámetros en tiempo real)</li> <li>• Se requiere cierto nivel de conocimientos técnicos y mantenimiento periódico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montaje complejo de componentes</li> <li>• Ingeniería avanzada y actividades de I+D</li> <li>• Desplazamiento tecnológico</li> <li>• Convergencia de conocimiento tecnológico</li> <li>• Imágenes satelitales, drones, IA y robótica</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia con datos de estudio empírico.

- Etapa I: Se considera de baja intensidad tecnológica debido a su enfoque tradicional y su relativa simplicidad en comparación con otras tecnologías. Consiste en la recolección y análisis manual de muestras de agua, sin requerir el uso directo de dispositivos electrónicos avanzados.
- Etapa II: Durante este período entre 1960 y 1970, se desarrollaron los primeros sensores electroquímicos para medir la concentración de diferentes sustancias en el agua, como el pH y la conductividad eléctrica. Estos sensores se basan en reacciones químicas que generan una señal eléctrica proporcional a la concentración de una sustancia específica.
- Etapa III: La Tecnología 4.0 busca una mayor conectividad, automatización y optimización en las industrias, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la calidad, la flexibilidad y la personalización de los productos y servicios, así como crear nuevas oportunidades de negocio. El uso de tecnologías que se desplazan de un sector a otro permite la conectividad e integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos de gestión.

Establecidas las tres etapas tecnológicas para la medición del agua superficial, se analizaron las princi-

pales características de la acumulación en cada etapa y los niveles de acumulación en las funciones técnicas según la taxonomía de las capacidades tecnológicas (Tabla 2).

**TABLA 2. Niveles de acumulación en cada etapa de tecnologías de análisis de la calidad del agua**

Etapa	Funciones técnicas de inversión		Funciones de producción		Funciones de apoyo		
	Toma de decisiones y control	Elaboración y puesta en marcha de proyectos	Procesos y organización de la producción.	Centrado en el producto	Desarrollo de vínculos externos	Desarrollo de vínculos internos	Modificación de equipos
Etapa 1	básico	básico	rutinario	rutinario	rutinario	rutinario	básico
Etapa 2	básico	básico	intermedio	básico	rutinario	básica	básica
Etapa 3	avanzado	avanzado	avanzado	avanzado	intermedia	intermedia	avanzada

Fuente: elaboración propia con datos de estudio empírico.

En la Etapa I (Tabla 2) se observan las siguientes características según las a) Funciones técnicas de inversión: la tecnología es básica, ya que se realiza una supervisión y control activo de estudios de factibilidad y viabilidad utilizando equipamiento estándar. b) Funciones de producción: en esta etapa, las funciones son rutinarias, ya que se replican especificaciones de procesos y se llevan a cabo operaciones simples, además de contar con un control de calidad rutinario basado en procesos establecidos. c) Funciones de apoyo: el nivel de capacidad tecnológica identificado es básico y rutinario, ya que se copian y adaptan ligeramente las especificaciones de equipos de prueba existentes utilizados para las mediciones in situ, se reconstruyen pequeños equipos sin asistencia técnica y se realiza un mantenimiento programado básico. Las relaciones son rutinarias, ya que se requieren autorizaciones de insumos, especificaciones técnicas de productos y procesos, y proyectos de inversión por parte de los líderes.

Las tecnologías desarrolladas en esta Etapa I, son de recolección de muestras de agua en diferentes puntos de interés. Estas muestras se analizan en un laboratorio para evaluar parámetros de calidad. Las ventajas, son su bajo costo inicial, permite la recolección de muestras representativas en cuerpos pequeños, flexibilidad. Entre sus desventajas, destaca que se requiere personal especializado, los resultados son limitados a puntos de muestreo específicos, el tiempo de obtención de los resultados de laboratorio, y recursos de logística para el análisis de muestras, además de que no se logra observar desplazamiento de contaminantes en los cuerpos de agua de interés de forma espacial y temporal. Su intensidad tecnológica se caracteriza por ser baja.

La etapa II, (tecnología electrónica), se destaca por el uso de dispositivos que permiten el monitoreo continuo y en tiempo real, brindando datos casi instantáneos. Aunque su instalación suele ser sencilla, esta etapa presenta algunas desventajas, como un costo inicial elevado y la necesidad de mantenimiento periódico, calibración y validación. En la tabla 2, se puede observar lo siguiente: a) En cuanto a las Funciones técnicas de inversión, el nivel es básico, ya que se lleva a cabo un seguimiento y control activo de los estudios de factibilidad relacionados con la calidad del agua. Además, existe un equipamiento estándar en el montaje medio de ingeniería. b) En las Funciones de producción, el nivel es intermedio, ya que se realiza

una validación de los procesos en función del producto y se implementan sistemas de mejora continua. Sin embargo, en las Funciones de producción centradas en el producto, si bien se logran mejoras en la calidad del producto, no se producen cambios radicales en el mismo. Finalmente, c) en las Funciones de apoyo, el nivel de acumulación es rutinario y básico, ya que se realizan adaptaciones menores en las especificaciones de los equipos de prueba existentes para la medición in situ.

La etapa II se caracteriza como de intensidad tecnológica media debido a la utilización de dispositivos electrónicos especializados, como sensores, que se instalan en los cueros superficiales de agua para medir parámetros en tiempo real. Aunque requiere cierto nivel de conocimientos técnicos y mantenimiento periódico, no alcanza el nivel de complejidad de otras tecnologías más avanzadas.

En la etapa III, como se puede observar en la tabla 2, se evidencian avances significativos en las a) Funciones técnicas de inversión, donde se desarrollan nuevos sistemas y diseños de procesos básicos, así como actividades de investigación y desarrollo (I+D) relacionadas. En cuanto a las b) Funciones de producción, también se presentan avances, ya que se innova en los procesos de I+D relacionados con el diseño de métodos de medición para evaluar la calidad del agua. En cuanto a las c) Funciones de apoyo, tanto en las relaciones internas como externas, se encuentran en un nivel intermedio, dado que existe una transferencia de tecnología que busca mejorar la eficiencia, calidad y convergencia entre diversos agentes y tecnologías. En el caso de la modificación de equipos, se alcanza un nivel avanzado, puesto que el diseño y construcción de equipos surge en esta etapa, aunque están influenciados por el desplazamiento de tecnologías existentes en otros sectores, lo cual conlleva la aparición de nuevos componentes basados en I+D.

Las tecnologías de la industria 4.0, como se menciona en el párrafo anterior, son tecnologías de alta intensidad tecnológica, en el contexto del monitoreo de la calidad del agua podría ser el uso de sistemas de detección avanzados basados en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (machine learning). Estos sistemas utilizan algoritmos sofisticados para analizar grandes cantidades de datos y reconocer patrones, lo que permite una evaluación más precisa y rápida de la calidad del agua.

Estos sistemas de IA pueden procesar datos de múltiples fuentes, como sensores in situ e imágenes satelitales, y combinarlos para obtener una visión integral de la calidad del agua, sobre todo en cuerpos de gran tamaño, de forma constante. Además, la IA puede adaptarse y aprender a medida que se obtienen nuevos datos, lo que mejora continuamente su capacidad de detección y análisis. La implementación de sistemas de IA para el monitoreo de la calidad del agua requiere una infraestructura tecnológica avanzada, incluyendo equipos de computación de alto rendimiento y algoritmos sofisticados. También implica la necesidad de profesionales capacitados en el desarrollo, implementación y mantenimiento de estos sistemas.

En cuanto a las imágenes satelitales, se consideran de intensidad tecnológica media. Debido a que, aun cuando su uso involucra tecnología de captura de imágenes desde el espacio, la limitación en la resolución espacial y la influencia de las condiciones atmosféricas reducen su nivel de complejidad tecnológica.

Por otro lado, los drones se clasifican también como de intensidad tecnológica media debido a su capacidad para volar, capturar imágenes y recopilar datos en áreas de difícil acceso. El uso de drones implica el manejo de tecnología aérea y el uso de sensores y cámaras especializadas. Sin embargo, en comparación con tecnologías más avanzadas como la inteligencia artificial o el análisis de big data, su nivel de complejidad tecnológica es menor.

Es importante tener en cuenta que la intensidad tecnológica puede variar y evolucionar con el tiempo, y la tecnología que hoy consideramos de alta intensidad puede cambiar en el futuro con el surgimiento de nuevas innovaciones y avances técnicos.

Las tecnologías observadas en la Tabla 2, son IA y tecnologías de la industria espacial. Cabe destacar que,

la industria espacial mexicana ha llegado a tener un crecimiento acelerado, representando un símbolo de los procesos de creación de conocimiento mexicano insertado en diferentes industrias, y de la innovación de procesos en industrias intensivas en conocimiento. La industria espacial mexicana está compuesta por grupo de empresas estatales, socios comerciales, proveedores especializados de servicios e instituciones asociadas. Una industria que pasó de un campo dominado por el gobierno a un campo impulsado comercialmente; lo que ha generado el desarrollo de capacidades dinámicas que responden a las demandas del entorno externo.

## 5. Conclusiones

Se ha declarado la década de 2020 como la década para la restauración de ecosistemas, por lo que las tecnologías de exploración, monitoreo y medición ambiental están ocupando un lugar central en el desarrollo sostenible (Howell et al., 2020; Waltham et al., 2020; Aguzzo et al. 2022). Las tecnologías que se utilizan para dichas tareas son tecnologías que han estado en desarrollo en las últimas dos décadas, entre las que resaltan la vigilancia satelital que permite el monitoreo, y análisis de la calidad del agua. Con estas tecnologías se permite hacer un análisis de tendencias y estimar información en tiempo y espacio.

Se identifican oportunidades a mediano plazo que involucran el uso y la combinación de tecnologías espaciales no solo para el análisis de aguas superficiales, sino también para aplicaciones relacionadas con aguas profundas. Esto se debe a que el 40.3% de los suministros de agua nacionales (excluyendo la hidroelectricidad) provienen de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2023), promoviendo el uso convergente de tecnologías científicas e industriales como la robótica, la inteligencia artificial (IA) y la tecnología espacial. En la actualidad, gran parte de la investigación espacial se aplica al monitoreo de la superficie oceánica, tanto con fines industriales como científicos (Anderson et al., 2017), y ahora se están expandiendo las operaciones para incluir los fondos marinos y las aguas profundas pelágicas (Wedler et al., 2018, 2020; Aguzzi et al., 2020).

Para el 2050 el reto al que se enfrenta la humanidad es el de alimentar a una población que alcanzará 9 000 millones de personas y se necesitara agua de calidad para producir el 60% de los alimentos adicionales que se calcula serán necesarios (FAO, 2023). Por lo que los análisis de tecnologías que monitoreen el medio ambiente deben ser parte de un estudio constante, y pueden ser tecnologías que se desplazan de otros sectores (como el espacial) las que contribuyan de manera positiva a necesidades humanas para el desarrollo sostenible. Este estudio es parte de un estudio a nivel nacional que tiene como objetivo establecer el sistema nacional de innovación del sector espacial, el cual actualmente tiene un desplazamiento tecnológico importante a otros sectores de la vida económica, social y ambiental del país. Entre ellos, se busca colaborar en la resolución de problemas relacionados con el desarrollo sostenible, como es el caso de la calidad del agua superficial.

## Referencias bibliográficas

- Aguzzi, J., Albiez, J., Flögel, S., Rune Godø, O., Grimsbø, E., Marini, S., Pfannkuche, O., Rodriguez, E., Thomsen, L., Torkelsen, T., Valencia, J., Lopez-Vazquez, V., Wehde, H., Zhang, G. (2020a). A flexible autonomous robotic observatory infrastructure for benthopelagic monitoring. *Sensors*, 20(6), 1614. <http://dx.doi.org/10.3390/s20061614>
- Aguzzi, J. et al. (2022). Developing technological synergies between deep-sea and space research. *Elem Sci Anth*, 10, 1. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00064>

- Anderson, K., Ryan, B., Sonntag, W., Kavvada, A., Friedl, L. (2017). Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Geo-spatial Information Science*, 20(2), 77–96. <http://dx.doi.org/10.1080/10095020.2017.1333230>
- AQUASTAT (2023). *El riego en América Latina y el Caribe en cifras: Encuesta*
- Arrow, K. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies*, 29(3), 155–73
- Bell, M. y Pavitt, K. (1995). Accumulation and industrial growth: contrast between developed and developing countries. *Industrial and Corporate Change*, 2(2)
- Biswas, A. K. y Tortajada, C. (eds.) (2018). *Assessing Global Water Megatrends*. Singapore: Springer Singapore
- CONAGUA (2023). *Estadísticas del agua en México, edición 2007*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Cui, R. Y. et al. (2018). Regional responses to future, demand-driven water scarcity. *Environ. Res. Lett.*, 13, 094006
- Ding, X., Tan, Y. y Hou, B. (2019). Spatio-temporal variation of heavy metal pollution during accidents: a case study of the Heshangshan Protected Water Area. *China Sustainability*, 11, 6919. <https://doi.org/10.3390/su11246919>
- Figueiredo, P. N. (2004). *Technological learning and competitive performance*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Howell, K. L., Hilario, A., Allcock, A. L., Bailey, D. M., Baker, M., Clark, M.R., Colaço, A., Copley, J., Cordes, E. E., Danovaro, R., Dissanayake, A., Escobar, E., Esquete, P., Gallagher, A. J., Gates, A. R., Gaudron, S. M., German, C. R., Gjerde, K. M., Higgs, N. D., Le Bris, N., Levin, L. A., Manea, E., McClain, C., Menot, L., Mestre, N. C., Metaxas, A., Milligan, R. J., Muthumbi, A. W. N., Narayanaswamy, B. E., Ramalho, S. P., Ramirez-Llodra, E., Robson, L. M., Rogers, A. D., Sellanes, J., Sigwart, J. D., Sink, K., Snelgrove, P. V. R., Stefanoudis, P. V., Sumida, P. Y., Taylor, M. L., Thurber, A. R., Vieira, R. P., Watanabe, H. K., Woodall, L. C., Xavier, J. R. (2020). A Blueprint for an inclusive, global deep-sea ocean decade field program. *Frontiers in Marine Science*, 7, 584861. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2020.584861>
- INEGI (2023). Población total de México. Censo
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M., Islam, M. K. (2015) Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecol Indic*, 48(282), 291. <https://doi.org/10.1016/j.ecoli nd.2014.08.016>
- Kummu, M. et al. (2016). *The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability*
- Liang, N., Yang, L., Dai, J. y Pang, X. (2011). Heavy metal pollution in surface water of Linglong Gold Mining Area, China. *Procedia Environ Sci*, 10, 914–917. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.146>
- Lintern, A., Webb, J. A., Ryu, D., Liu, S., Bende-Michl, U., Waters, D., Leahy, P., Wilson, P., Western, A. W. (2018). Key factors influencing differences in stream water quality across space. *Wires Water*, 5, e1260. <https://doi.org/10.1002/wat2.1260>
- Liu, J. et al. (2017). Water scarcity assessments in the past, present and future. *Earth's Future*, 5, 545–59.
- Lyman, W. J. (1995). Transport and transformation processes. En G. M. Rand (ed.), *Fundamentals of aquatic toxicology—effects, environmental fate, and risk assessment* (2a ed.) (pp 449–493). Taylor & Francis.
- Michelle, T. H., van Vliet et al. (2021). *Environ. Res. Lett*
- Pasinetti, L. (1983). *The Accumulation of Capital*
- Schewe, J. et al. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change *Proc. Natl Acad. Sci.*, 111, 3245–50
- Schumpeter, J. (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy*. Harper & Brothers Publishers

- Sinha, E., Michalak, A. M. y Balaji, V. (2017). Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. *Science*, 357, 405–8
- Solow, R. (1956). *A Contribution to the Theory of Economic Growth*. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94
- Su, S., Xiao, R., Mi, X., Xu, X., Zhang, Z. y Wu, J. (2013). Spatial determinants of hazardous chemicals in surface water of Qiantang River, China. *Ecol Indic*, 24, 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.015>
- Tripodi, M. A., Cueto, G. R., Muschetto, E. et al. (2022). Intra- and inter-annual variations in metal concentrations in the superficial water of a highly polluted urban basin of Argentina. *Environ Sci Pollut Res*, 30, 60838–60853. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26391-w>
- Vanham, D. et al. (2018). Physical water scarcity metrics for monitoring progress towards sdg target 6.4: an evaluation of indicator 6.4.2 'level of water stress'. *Sci. Total Environ.*, (613–614), 218–32
- Waltham, N. J., Elliott, M., Lee, S. Y., Lovelock, C., Duarte, C. M., Buelow, C., Simenstad, C., Nagelkerken, I., Claassens, L., Wen, C. K. C., Barletta, M., Connolly, R. M., Gillies, C., Mitsch, W. J., Ogburn, M. B., Purandare, J., Possingham, H., Sheaves, M. (2020). UN Decade on ecosystem restoration 2021–2030: What chance for success in restoring coastal ecosystems? *Frontiers in Marine Science*, 7, 71. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2020.00071>
- Wedler, A., Schuster, M. J., Müller, M. G., Vodermayr, B., Giubilato, R., Vayugundla, M., Smisek, M., Do mel, A., Steidle, F., Lehner, P., Schroder, S., Staudinger, E., Foing, B., Reill, J. (2020). German aerospace centers advanced robotic technology for future lunar scientific missions. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A* 379(2188), 20190574. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2019.0574>
- Wedler, A., Wilde, M., Reill, J., Schuster, M., Vayugundla, M., Brunner, S., Bussmann, K., Do mel, A., Drauschke, M., Gmeiner, H., Lehner, H., Lehner, P., Müller, M. G., Stürzl, W., Triebel, R., Vodermayr, B., Borner, A., Krenn, R., Dammann, A., Fiebig, U. C., Staudinger, E., Wenzhoefer, F., Flogel, S., Sommer, S., Asfour, T., Flad, M., Hohmann, S., Brandauer, M., Albu-Schäffer, A. O. (2018). *From single autonomous robots toward cooperative robotic interactions for future planetary exploration missions*. Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC). Bremen, Germany