

Calidad del agua y seguridad ante inundaciones en la gestión sostenible del recurso hídrico

Water quality and flood safety in the sustainable management of water resources

Cortez-Mejía, P.^{a1*}, Tzatchkov, V.^{a2}, Rodríguez-Varela, J.M.^{a3}, Llaguno-Guilberto, O.J.^{a4}

^aInstituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.
E-mail: ^{a1}pcortes@tlaloc.imta.mx, ^{a2}velitchk@tlaloc.imta.mx, ^{a3}manuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx, ^{a4}oscar_llaguno@tlaloc.imta.mx

*Autor para correspondencia

Recibido: 21/04/2020 Aceptado: 29/12/2020 Publicado: 31/01/2021

Citar como: Cortez-Mejía, P., Tzatchkov, V., Rodríguez-Varela, J.M., Llaguno-Guilberto, O.J. 2021. Water quality and flood safety in the sustainable management of water resources. *Ingeniería del agua*, 25(1), 15-36. <https://doi.org/10.4995/la.2021.13570>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es valorar opciones de indicadores estratégicos, complementarios a los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), para medir anualmente el impacto de programas presupuestarios Estatales en la gestión del recurso hídrico. Se analizaron los indicadores del ODS 6 y del ODS 11, y el Índice Global de Seguridad Hídrica propuesto internacionalmente con base en dichos objetivos; se puso énfasis en las componentes de calidad del agua y de protección contra inundaciones. Se contrastaron los resultados de estos indicadores con los de un diagnóstico general de Seguridad Hídrica en México y sus retos principales del año 2019. Se analizó también la disponibilidad de datos oficiales para el monitoreo de estos componentes de Seguridad Hídrica, y se propuso una opción de indicadores para valorar en una siguiente etapa. Se hizo un ejercicio preliminar con datos disponibles, para estas componentes de calidad y de protección, que según el Índice Global indicado son los más críticos en la Seguridad Hídrica en México.

Palabras clave | calidad del agua; inundaciones; gestión sostenible; seguridad hídrica.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate strategic indicator options, complementary to the indicators of the Sustainable Development Goals (SDGs), to measure annually the impact of sub-national budget programs on water resource management. The indicators of SDG 6 and SDG 11 were analyzed, as well as the internationally proposed Global Water Security Index based on these objectives; Emphasis was placed on the components of environmental water quality and flood protection. The results of these indicators for Mexico were compared with those of the national diagnosis of water security. The availability of official data for monitoring these water security issues was also analyzed, and an option of indicators was proposed to assess in a next stage. A preliminary exercise was carried out with available data for quality and protection issues, which are the most critical in Mexico's water security according to the indicated Global Index.

Key words | water quality; floods; sustainable management; water security.

INTRODUCCIÓN

El agua renovable *per cápita* de México es sensiblemente de las menores de América y del Caribe; su valor varía entre 2500 y 7500 m³/hab/año, mientras que países como Estados Unidos están entre 7500 y 15 000 m³/hab/año, y otros como Canadá y Chile están por arriba de 50 000 m³/hab/año (UN-WWAP, 2015). Esta limitante física así como cuestiones de tipo socioeconómico y de gobernanza, causan que la demanda del recurso hídrico en varias regiones del país supere a la oferta de equilibrio, ocasionando su sobreexplotación y contaminación. En este contexto, dentro de sus diferentes usos, aunque entre el 91% y 100% de la población recibe servicios básicos de agua potable, sólo un 26% recibe los servicios manejados de manera segura, es decir, en su domicilio, cuando lo necesita, y libre de contaminación; un valor similar se reporta para el saneamiento manejado de manera segura (UN, 2018). Relacionado con estos valores, Daza (2008) refiere que el ciclo integral del agua, enfocado al uso público urbano, consiste en cumplir el ciclo hidrológico tal como se da en la naturaleza, manteniendo la circulación del agua mediante su uso y devolución al medio en las mejores condiciones de calidad posibles, con el fin de que puede seguir siendo utilizada. Además, la ocurrencia espacial y temporal de los procesos del ciclo hidrológico en el país, es de una alta variabilidad, y sus valores extremos causan año con año importantes pérdidas de vidas humanas y económicas, por inundaciones y sequías (CONAGUA, 2016a, 2106b, 2016c; CENAPRED, 2019). Por estas razones la calidad del agua, en su aspecto ambiental, y la protección contra inundaciones son de los componentes de Seguridad Hídrica que mayores problemas presentan en México. Conforme a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), el Programa de las Naciones para el Desarrollo (PNUD) y otras instancias, éstos y otros problemas se deben principalmente a las brechas de gobernanza multinivel que se han identificado en su sector agua, en los tres órdenes de gobierno, ya que en el caso particular de los Municipios, éstos cuentan con amplias facultades de gestión, pero carecen de respaldo presupuestal y de otras capacidades funcionales. Por ello han planteado acciones específicas tendientes a revertir esta situación (OECD, 2012; Martínez Austria et al., 2019; PNUD, 2019).

A nivel global, dentro de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODSs), el ODS 6 y el ODS 11, con sus metas e indicadores de avances, se centran en la Seguridad Hídrica de los países (ONU, 2017). Se establece que los indicadores pueden complementarse con propuestas nacionales y regionales, que los Estados miembros pueden seguir desarrollando (UN, 2018). Al respecto Gain et al. (2016) propusieron el Índice Global de Seguridad Hídrica, con el que obtuvieron valores los cuales fueron presentados en mapas globales. En México el Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (CONAGUA, 2014) incluyó indicadores de avances, sobre los que recibió recomendaciones del Consejo Nacional de Evaluación de la Política Social de incluir más indicadores de resultados, con los criterios mínimos de pertinencia, relevancia, claridad y monitoreabilidad (CONEVAL, 2017). De todo esto se puede ver la necesidad de agregar elementos complementarios para evaluar más claramente las políticas públicas y programas presupuestarios municipales y estatales, aplicados a la Seguridad Hídrica de sus territorios y poblaciones.

En este trabajo se presenta el análisis de los indicadores de calidad del agua y de protección contra inundaciones, de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 11 (ONU, 2018), así como los del Índice Global de Seguridad Hídrica (GWSI) (Gain et al., 2016), en el marco de la situación particular de México y de la publicación de datos oficiales, para valorar la viabilidad de su aplicación a nivel Estatal. Se evaluaron como una primera etapa a nivel estatal, con bases de datos existentes generadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016b) y por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019); se integró y procesó información anual sobre parámetros de calidad del agua y daños generados por inundaciones. Con esto se busca que dichos indicadores adaptados puedan ser calculados anualmente en Estados y Municipios del país, con la finalidad de observar su evolución en el tiempo y determinar el efecto de las políticas públicas en la conservación del recurso agua.

LA SEGURIDAD HÍDRICA A NIVEL INTERNACIONAL

La Organización de las Naciones Unidas define la Seguridad Hídrica como *la capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para mantener los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella* (UN-Water, 2013). Dentro de la situación actual, más del 80% de las aguas residuales resultantes de las actividades humanas se vierte en ríos o el mar sin que se eliminen los contaminantes, y el 70% de las muertes causadas por desastres

naturales se deben a las inundaciones y los desastres relacionados con el agua (ONU, 2017). Las metas de dos de los 17 Objetivos Globales para el Desarrollo Sostenible (ODS's), de la Agenda 2030, son alcanzar esas capacidades de Seguridad Hídrica (ONU, 2018). El ODS 6 busca “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” a través de ocho metas, y el objetivo 11 “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”, mediante 10 metas (ONU, 2018). En el tema de contaminación del agua en el medio ambiente la meta (6.3) al año 2030 contempla eliminar el vertimiento de productos químicos, así como materiales peligrosos, reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar, aumentar el reciclado y rehusos sin riesgos. Sobre la protección contra los desastres, la meta 11.5 al año 2030 es reducir el número de muertes, así como de personas afectadas, que incluyen los desastres relacionados con el agua, la reducción de pérdidas económicas directas, considerando en especial la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad (ONU, 2017). La meta de Seguridad Hídrica 11.5 arriba descrita y las ocho metas del ODS 6, las cuales son: 6.1 agua potable, 6.2 saneamiento e higiene, 6.3 calidad del agua y aguas residuales, 6.4 uso de los recursos y escasez, 6.5 gestión de los recursos, 6.6 ecosistemas, 6.a y 6.b cooperación y participación, enmarcan el ciclo del agua en los ODS (UN-Water, 2017). El monitoreo de la meta 11.5 se realiza mediante el indicador el 11.5.1 que toma en cuenta el número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100 000 personas, y el 11.5.2 por las pérdidas económicas directas en relación con el PIB mundial, daños en la infraestructura crítica y número de interrupciones de los servicios básicos atribuidos a desastres. Estos indicadores son también descritos bajo el ODS 1 “Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo”, que son a su vez parte del Marco Sendai para Reducción de Riesgos de Desastres (UNEP, 2019; UNDRR, 2019; ONU, 2018).

Los avances de la meta 6.3 se monitorean mediante el indicador 6.3.1 que evalúa la proporción de las aguas residuales tratadas de forma segura, y el 6.3.2 que evalúa la proporción de cuerpos de agua con buena calidad del agua ambiental (UN, 2018; UN Water-UNEP, 2018). Aquí se considera que existe una relación entre los diferentes usos del agua, las aguas residuales que generan, su tratamiento, y la calidad del agua. La metodología del indicador 6.3.2 evalúa el impacto combinado de todas las descargas de aguas residuales y utiliza un índice de calidad del agua considerando los siguientes parámetros: pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, nitrógeno y fósforo. Su aplicación requiere de un programa de monitoreo en ríos, lagos y aguas subterráneas. Los valores medidos se comparan con valores objetivo que representan la calidad del agua no perjudicial para la salud humana o para el ecosistema acuático. Si el 80 por ciento de los parámetros de todas las estaciones de monitoreo dentro del cuerpo de agua cumplen con los valores objetivo establecidos, éste se clasifica con una buena calidad. Esta metodología fue revisada en 2016 y aplicada a nivel mundial en 2017. De los países que participaron en la aplicación, el 75 por ciento considera que este indicador caracteriza el estado de su calidad de agua, pero el resto estima que no la describe de manera apropiada, ya que no incluye ciertos parámetros microbiológicos y de metales pesados. A este respecto el indicador 6.3.2, considera un segundo nivel de monitoreo progresivo de parámetros, que depende de los diferentes usos del agua. Para el agua potable se requiere mantener bajos niveles de patógenos y toxinas; para la irrigación bajos niveles de sales, y para ciertas industrias bajos niveles de materiales suspendidos. Por su parte los ecosistemas acuáticos requieren oxígeno y nutrientes naturales, bajos niveles de sólidos suspendidos y estar libres de sustancias tóxicas, o con muy bajo contenido. Sin embargo, estos ecosistemas son los más impactados, debido a las descargas de los usos mencionados, con aguas residuales no tratadas, escurrimientos con fertilizantes y pesticidas, materia orgánica, residuos farmacéuticos, drenaje salino, etcétera. Asimismo por contaminantes emergentes debido al uso de productos farmacéuticos y de cuidado personal, que plantean un problema de falta de monitoreo para la calidad del agua superficial y subterránea (UN Water-UNEP, 2018).

La ONU establece que las metas de los ODS's son universalmente aplicables, y cada gobierno decide cómo incorporarlas a sus procesos de planificación, políticas y estrategias nacionales (UN, 2018). Asimismo, indica que el monitoreo de avances es un proceso de aprendizaje, revisión y mejora; la selección de indicadores, la recopilación de datos y las metodologías representan trabajo en progreso. Los indicadores globales pueden complementarse con indicadores nacionales, regionales y temáticos adicionales, que los Estados miembros pueden seguir desarrollando (UN, 2018). Sin embargo, la ONU busca evitar rezagos de cumplimiento como los ocurridos con los Objetivos de Desarrollo del Milenio 2000-2015, por falta de monitoreo y evaluación, por lo que promueve que las Entidades Fiscalizadoras Superiores, se encarguen de la transparencia y rendición de cuentas sobre la Agenda 2030 y los ODS's, mediante la fiscalización de: a) La eficacia, eficiencia y economía con la que están operando las políticas relacionadas con la Agenda, y b) La preparación de la implementación y seguimiento de cada uno de los 17 ODS (ASF, 2018). En el caso de México la Auditoría Superior de la Federación (ASF) participa desde el año 2015 en estas tareas. Al año 2017 reporta hallazgos en la operación de la política pública que pueden ser obstáculo para la consecución de los ODSs, que se encuentran vinculados a la acción

gubernamental; hallazgos respecto a la preparación, implementación y seguimiento de la Agenda 2030, pero también hallazgos de buenas prácticas (ASF, 2018). El cumplimiento de estas metas en cada país requiere de la aplicación de políticas públicas y programas presupuestarios apropiados, cuyo impacto directo en la población y en áreas de enfoque se evalúe anualmente, mediante indicadores de tipo estratégico (SHCP, 2016).

LA SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO

En el pasado Programa Nacional Hídrico (PNH) 2014-2018 (PNH, 2014), se establecieron las metas y ocho indicadores de seguimiento y evaluación. Dentro de estos indicadores se estableció el Índice Global de Sustentabilidad Hídrica (IGSH) que evalúa el grado de presión sobre el recurso hídrico, la medición del ciclo hidrológico, la calidad del agua, y la gestión hídrica. De acuerdo al PNH, la calidad del agua se mide mediante los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) a los cinco días, Demanda Química de Oxígeno (DQO), y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

El IGSH tuvo una línea base en el año 2012 de 0.552, clasificada como sustentabilidad hídrica media, con una meta al año 2018 de 0.684. Otro indicador fue el Índice Global de Acceso a los Servicios Básicos de Agua (IGASA) que valora el impacto del PNH en la cobertura, calidad y eficiencia de los servicios de agua potable y saneamiento; la línea base de este indicador al año 2012 fue de 0.652, que califica a los servicios como regulares, y tuvo una meta al año 2018 de 0.761 (CONAGUA, 2014). En el año 2017, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política Social (CONEVAL) determinó que el IGSH subió a 0.58, y el IGASA a 0.74, por lo que sugirió, entre otras cosas, analizar por qué el IGSH no estaba cumpliendo con las metas trazadas inicialmente, e incluir más indicadores de resultados del programa, con los criterios mínimos de pertinencia, relevancia, claridad y monitoreabilidad (CONEVAL, 2017).

Situación general de la Seguridad Hídrica

Martínez Austria et al. (2019) presenta un diagnóstico actual de la Seguridad Hídrica en México. Algunas de las conclusiones más relevantes, disgregadas por criterio de seguridad, se describen a continuación:

Disponibilidad: La mayoría de las cuencas del centro y norte del país, así como la del río Lerma y Valle de México, están altamente explotadas o sobreexplotadas; se prevé que para el año 2030 la mayor parte del territorio presente condiciones de estrés hídrico, escasez o escasez absoluta ($<500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$); en la frontera sur se importan más de 3.4×10^4 hectómetros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$) de agua y en la frontera norte, en las zonas áridas, $5900 \text{ hm}^3/\text{año}$; al año 2015, 105 de los 653 acuíferos están sobreexplotados; éstos abastecen a más de 71 millones de habitantes ($7320 \text{ hm}^3/\text{año}$) y al menos el 50% de las industrias auto abastecidas ($2070 \text{ hm}^3/\text{año}$); más de 5000 presas y bordos almacenan aproximadamente $150\,000 \text{ hm}^3$, de las cuales 180 grandes presas concentran el 82% del total, principalmente para riego agrícola y generación de energía; 76.3% del agua extraída se usa en la agricultura, 14.6% en abastecimiento público, 4.8% en la generación de energía y 4.3% en la industria autoabastecida; la eficiencia global de riego es de apenas 34.9%; la exportación de agua y energía virtuales a través de productos agrícolas, industriales o de servicios rebasa en muchos casos el potencial de sustentabilidad.

Accesibilidad a los servicios de agua y saneamiento: La cobertura nacional de agua potable reportada en 2010 es 95.59% en zonas urbanas y 75.69% en zonas rurales; en municipios con mayor grado de pobreza, de Chiapas, Tabasco, Campeche, Veracruz, Oaxaca y Guerrero, es menor al 60%. Leó Heller (ACNUDH, 2020), Relator Especial sobre los Derechos Humanos al Agua y al Saneamiento, informó en mayo de 2017 que aunque se reporta una estadística de acceso a los servicios, del 94% y 93% respectivamente, *ésta es dramáticamente inferior*, pues sólo refleja la existencia de infraestructura. Del total generado de aguas residuales municipales se colecta el 91.5%, que corresponde a un caudal de $212 \text{ m}^3/\text{s}$, del cual se trata el 57%; en el año 2015 la industria trató $70.5 \text{ m}^3/\text{s}$ de sus aguas residuales, mediante tratamientos primarios y secundarios que no remueven compuestos como plaguicidas, fármacos, antibióticos, y otros contaminantes emergentes. Muchos de los ríos urbanos se han convertido en drenajes de aguas residuales, y la mayoría se ha entubado.

Calidad del agua y protección ante inundaciones: Se indica que la evaluación de la calidad del agua se realiza a través de parámetros como: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST); esta evaluación no incluye la contaminación industrial o de drenajes agrícolas, nociva para la salud y el medio ambiente, por lo que se considera muy laxa. El nivel de contaminación actual del agua se debe al bajo porcentaje de aguas residuales tratadas y al bajo nivel de tratamiento exigido. Asimismo, año con año suceden eventos extremos, como la sequía del periodo 2011-2013 en el norte de México y las inundaciones catastróficas de septiembre de 2013 en el centro y sur en ambos litorales, con pérdidas humanas cada vez mayores (300 en 2013), y pérdidas económicas que alcanzan ya decenas de miles de millones de pesos anuales (cerca de 55 mil millones de pesos en 2013 y más de 85 mil millones en 2010).

Gestión del recurso hídrico: El 73% de los ríos de México presentan niveles medio y muy alto de alteración ecohidrológica, pues la norma emitida de mínimo caudal ecológico es de carácter voluntario. La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE, 2013) reporta brechas de gobernanza multinivel en el sector agua, que son: brecha administrativa, de información, de políticas, de capacidades, de financiamiento, de objetivos, y de rendición de cuentas. Se concluye la necesidad de una profunda reforma del sector hídrico, gobernanza del agua, aspectos legales e institucionales, financiamiento, formación de capital humano, nuevas obras ambientalmente amigables, modificación de políticas públicas para detener y revertir la tendencia a una menor Seguridad Hídrica. Los principales retos para alcanzar la Seguridad Hídrica son la escasez de agua, el deterioro ambiental, la contaminación de los cuerpos de agua, los efectos adversos de los eventos hidrometeorológicos extremos y los crecientes conflictos por el agua. Estos retos son inducidos por el crecimiento de la población y la urbanización, la necesidad de una mayor producción de alimentos, mayor demanda de agua para producción de energía, efectos del cambio climático y una deficiente gestión del agua.

Situación del tratamiento del agua y daños por inundaciones

Al año 2015 la población reportada con servicio de alcantarillado es del 91.4%, y el porcentaje de tratamiento de las aguas residuales municipales recolectadas del 57.0%, en 2477 plantas de tratamiento en operación (Ver Tabla 1). De las aguas residuales no municipales, generadas por otros usos como la industria autoabastecida, que descargan directamente a cuerpos de agua nacionales, se trata un 32% de su volumen, pero en carga contaminante sólo el 14.6% (CONAGUA, 2016b; CONAGUA, 2016c) (Ver Tabla 2).

Tabla 1 | Aguas residuales municipales 2015 en México. Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2016b).

Concepto/cantidades	Miles de hm ³ /año	m ³ /s	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Aguas residuales municipales Carga contaminante generada	7.23	229.1	1.95
Recolectadas en alcantarillado Carga recolectada	6.69	212.0	1.81
Aguas tratadas Carga removida	3.81	120.9	0.84

Tabla 2 | Aguas residuales no municipales 2015 en México. Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2016b).

Concepto/cantidades	Miles de hm ³ /año	m ³ /s	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Aguas residuales no municipales Carga contaminante generada	6.77	214.6	10.15
Aguas tratadas Carga removida	2.22	70.5	1.49

Por otra parte, en la Figura 1 se muestran los daños causados por los principales desastres de origen natural y antrópico ocurridos en el país del año 2000 al 2018, incluidos aquellos relacionados con el agua, tanto en fallecimientos como en pérdidas económicas. Para el año 2018 los fenómenos hidrometeorológicos ocasionaron el 84.4% del monto total de daños y pérdidas, siguiéndole los de origen geológico con el 9.9%. Se registraron 501 fallecimientos, de los cuales el 22% corresponden a fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2019).

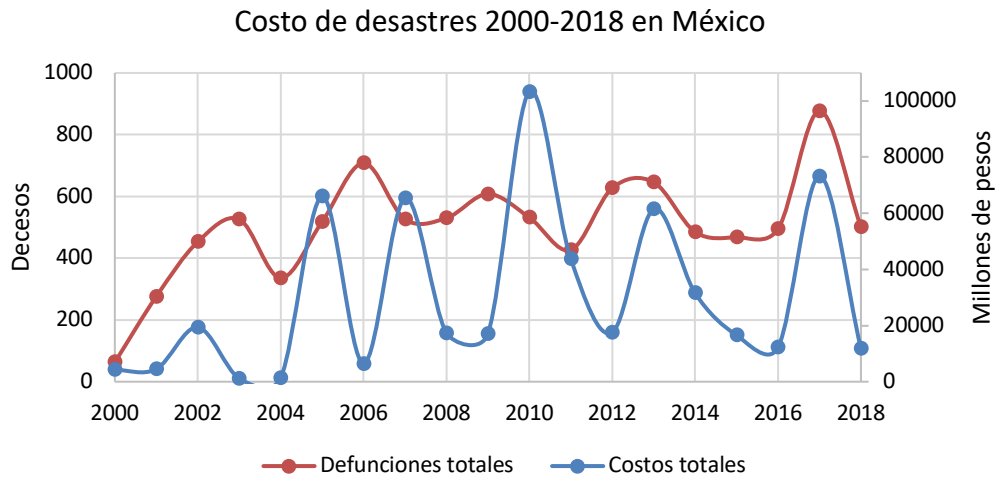


Figura 1 | Impactos socioeconómicos causados por los desastres ocurridos en México del año 2000 al 2018. Fuente: Elaboración propia con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019).

Índice de Seguridad Hídrica en México

El Índice Global de Seguridad Hídrica (GWSI por sus siglas en inglés) propuesto por Gain et al. (2016), está basado en el ODS 6; integra criterios físicos y socioeconómicos de disponibilidad del agua, accesibilidad a los servicios de agua y saneamiento, calidad del agua y protección ante inundaciones, y administración (gestión del recurso). Cada criterio está en función de indicadores y pesos los cuales se muestran en la Figura 2. El Índice de Calidad del Agua mostrado corresponde al indicador 6.3.2 sobre la calidad del agua del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés), con los mismos parámetros.

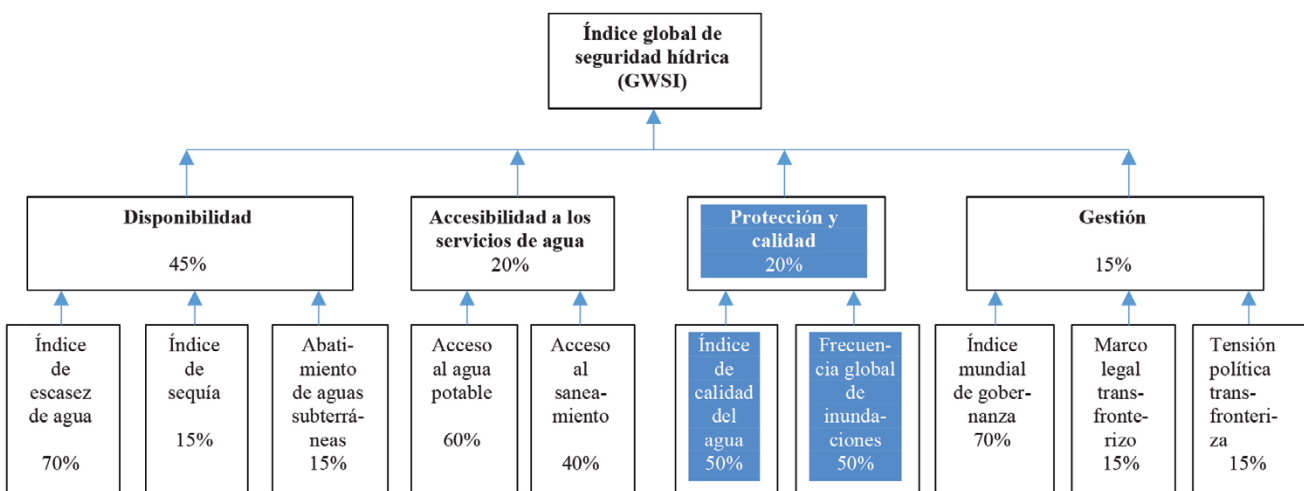


Figura 2 | Esquema del índice de protección y calidad dentro del índice Global de Seguridad Hídrica. Fuente: Elaboración propia a partir de (Gain, et al., 2016).

Conforme a (Gain et al., 2016), el GWSI se determinó agregando valores normalizados de cada indicador en mapas espaciales, sobre la base de píxel por píxel, usando métodos multicriterio espaciales (MCA, por sus siglas en inglés), ponderación aditiva simple (SAW, por sus siglas en inglés) y media ponderada ordenada (OWA, por sus siglas en inglés). Se indica que los datos se obtuvieron de diferentes fuentes, con diferentes resoluciones, y que fueron procesados en una estructura de Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) común, con una resolución de 5 minutos. Las dimensiones físicas de escasez, sequías y agotamiento de acuíferos, se obtuvieron con base en la aplicación del modelo hidrológico PCR-GLOBWB, y los indicadores socioeconómicos, derivados de estadísticas mundiales (Gain et al., 2016). La valoración de la Seguridad Hídrica Global realizada por Gain et al. (2016) se presenta en mapas en los que se puede identificar el desempeño de cada región y país mediante una escala de colores entre rojo y azul, correspondientes a valores “0-1” que representan “baja a alta” condición. Para México se pueden observar los siguientes valores aproximados: disponibilidad ≈ 0.50 , con algunas zonas aisladas cercanas al color rojo; accesibilidad, varía entre ≈ 0.69 y ≈ 0.81 ; calidad y protección ≈ 0.44 en unas zonas y entre ≈ 0.25 a 0.31 en el resto; administración entre ≈ 0.56 y 0.63 , excepto en las fronteras donde es menor; y el valor de GWSI ≈ 0.5 , presentando un valor mayor de seguridad en el norte del país y un menor valor en el sur; el valor medio de 0.5 es numéricamente parecido al valor 0.552 de la línea base 2012 del IGSH del Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (PNH). En la Figura 3 se muestran los valores aproximados para cada criterio y el índice de seguridad resultante, éste último calculado también a partir de los valores observados de cada criterio y sus pesos. Las componentes de calidad y protección presentan muy baja condición en muchas de las cuencas del país, principalmente por contaminación en las zonas industrializadas.

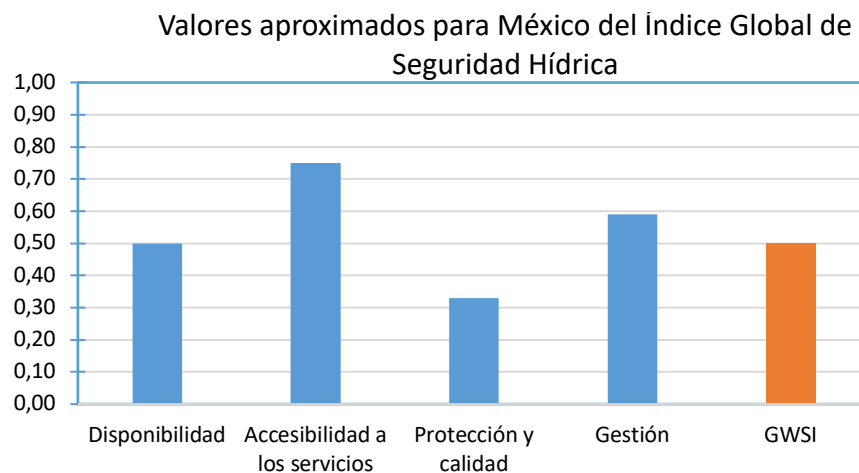


Figura 3 | Valores de seguridad hídrica de México. Elaborado a partir de datos de Gain et al. (2016).

Contraste de resultados del GWSI para México

Se contrastaron los resultados observados para México del Índice Global de Seguridad Hídrica (GWSI) con los del anterior diagnóstico y con los indicadores respectivos de metas del ODS 6 y del ODS 11, como se describe a continuación:

- A. El Índice de Disponibilidad del recurso hídrico, con valor de ≈ 0.5 corresponde a la meta 6.4 “*Para aumentar la eficiencia del uso del agua, garantizar la extracción sostenible y el suministro de agua dulce para abordar la escasez*”, y en sus indicadores 6.4.1 “*Cambio en la eficiencia del uso del agua a lo largo del tiempo*” y principalmente el 6.4.2 “*Nivel de estrés hídrico*”, monitoreados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (UN, 2018). La disponibilidad es función de la escasez, la sequía y el abatimiento de aguas subterránea, y un valor cercano a 1 significa buena condición, mientras que para el estrés hídrico significa mala condición. Los niveles de estrés según el indicador 6.4.2, publicados en 2016, muestran que México se encuentra entre 25% y 70% (UN, 2018), por lo que se puede aceptar un promedio de $\approx 50\%$ de estrés hídrico, y por tanto $\approx 50\%$ de recursos de agua dulce disponibles, que llevarían a valores parecidos a los del índice de disponibilidad. Además si se considera el agua disponible *per capita* se puede mencionar que se ha reducido en más de 85 % el agua disponible, dado que en 1910 se tenía un disponibilidad promedio de

31 000 m³/hab/año (SEMARNAT, 2020) y se estima para el año 2017 un valor de 3656 m³/hab/año (CONAGUA, 2018a), aunado a una variabilidad notable entre el sur (18 776 m³/hab/año) comparado con el norte del país (1019 m³/hab/año); esta disminución se debe particularmente al crecimiento acelerado de la población, cambio climático, sequías, etcétera.

- B. El valor del Índice de Accesibilidad a los servicios de agua y saneamiento, entre ≈ 0.69 y ≈ 0.81 , parece corresponder a valores de servicios básicos, que son altos en México. Si se emplean los valores de servicios manejados de manera segura, entre 25% a 26% en ambos casos, (UN, 2018), el resultado de la accesibilidad sería ≈ 25.5 . Esto considerando que el GWSI y sus indicadores se plantearon con base en el ODS 6, donde el seguimiento y monitoreo de los servicios de agua y saneamiento se hace a través de los indicadores 6.1.1 “Proporción de la población que utiliza servicios de agua potable gestionados de manera segura”, y 6.2.1a “Proporción de población que usa servicios de saneamiento manejados de manera segura” (UN, 2018; WHO-UNICEF, 2019).
- C. Índice de Protección y Calidad, cuyo valor promedio de ≈ 0.33 , de baja condición, numéricamente pudiera representar a la situación del país. Sin embargo, sobre los parámetros de su componente de calidad del agua, que corresponden a los del indicador 6.3.2 del ODS 6 (pH, Oxígeno Disuelto, Conductividad Eléctrica, Nitrógeno y Fósforo), 25 por ciento de los países considera que no caracteriza el estado de su calidad de agua de manera apropiada, debido a la falta de parámetros microbiológicos y metales pesados (UN Water-UNEP, 2018). Este es el caso de México según los resultados del diagnóstico de Martínez Austria et al. (2019), del monitoreo que realiza la CONAGUA se reporta una alta contaminación por coliformes fecales (CONAGUA, 2017), y otros estudios como el de Covarrubias & Peña Cabriales (2017) por metales pesados. En cuanto a su componente de frecuencia de inundaciones, ésta evalúa indirectamente las afectaciones debido a estos desastres. Sin embargo en el ODS 11 la protección se evalúa con indicadores como el 11.5.1 “Número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100 000 personas”, y el 11.5.2 “Pérdidas económicas directas en relación con el PIB mundial, daños en la infraestructura crítica y número de interrupciones de los servicios básicos atribuidos a desastres” (UNDRR, 2019; ONU, 2018), para lo cual el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) cuenta con suficiente información (CENAPRED, 2019; Martínez Austria et al., 2019).
- D. El Índice de Gestión, con un valor medio de ≈ 0.59 , que corresponde con la meta 6.5 la cual es implementar la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) a todos los niveles, y con los indicadores 6.5.1 y 6.5.2 para medir el grado de implementación, y la proporción del área de la cuenca transfronteriza con un acuerdo operativo para la cooperación en materia de agua, respectivamente. En el indicador 6.5.1 el puntaje se determina a través de un cuestionario autoevaluado del país, con 33 preguntas divididas en cuatro secciones: políticas, leyes y planes; instituciones y participación; instrumentos de gestión; y financiamiento. Su valor para México es clasificado como medio bajo, entre 31% y 50% (UN, 2018), y su promedio ≈ 0.41 , por lo que el valor del índice de gestión sobrestima un tanto la situación, concordando con lo observado en el diagnóstico respecto a la gestión deficiente y brechas de gobernanza multinivel en el sector agua en México (Martínez Austria et al., 2019).
- E. Finalmente, el valor para México del Índice Global de Seguridad Hídrica (GWSI) puede evaluarse con un menor valor en base a los 4 criterios mencionados anteriormente (actualmente tiene un aproximado de 0.5).

La anterior comparación de resultados del GWSI para México muestra la necesidad de revisar, complementar datos y parámetros para su aplicación nacional, según los indicadores del ODS 6 y del ODS 11, pero también muestra que el indicador GWSI que es estratégico, es una alternativa viable para evaluar en cada país la situación de la Seguridad Hídrica, así como el avance de las metas respectivas de los ODS's. Respecto a las ponderaciones consideradas en la metodología del GWSI, las cuales indican que son subjetivas, se recomienda en el futuro, establecerlas mediante la aplicación de prácticas de procesos participativos con las partes interesadas relevantes (ejemplo: formuladores de políticas, instituciones, Organizaciones No Gubernamentales, etcétera.).

NECESIDAD DE INDICADORES ESTATALES

El CONEVAL recomienda incluir indicadores de resultados del PNH, adicionales a los contemplados para su seguimiento (CONEVAL, 2017). De acuerdo con Martínez Austria et al. (2019) la OCDE reporta brechas de gobernanza multinivel en el sector

agua de México, que tienen que ver con las capacidades locales (OCDE, 2013). En ese mismo sentido el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2019), en el *Informe de Desarrollo Municipal 2010-2015, Transformando México desde lo Local*, indica que los Municipios de México pueden con sus facultades influir en al menos 129 de los 232 indicadores con los que la ONU monitorea las 169 metas de los 17 ODSs, pero que no cuentan con respaldo presupuestal ni con mecanismos suficientes de rendición de cuentas, por lo que se recomienda que los tres órdenes de gobierno realicen las reformas necesarias para mejorar las capacidades funcionales municipales y orientar sus acciones al logro de los ODS's (PNUD, 2019). Por su parte la Auditoría Superior de la Federación (ASF) reporta hallazgos sobre la operación de la política pública y sobre la preparación, implementación y seguimiento de la Agenda 2030 (ASF, 2018), que conforme a las facultades mencionadas de los municipios, les compete atender parte de las observaciones. Todo esto permite identificar la necesidad de evaluar la contribución estatal y municipal al logro de los ODS y de la Seguridad Hídrica Nacional. A continuación se analizan los requerimientos para la aplicación de los indicadores de calidad del agua y de frecuencia de inundaciones del GWSI, teniendo en cuenta el indicador 6.3.2, el 11.5.1 y el 11.5.2, arriba descritos.

Análisis para la aplicación sistemática de los indicadores

Al año 2019 México está integrado por 32 entidades federativas y un total de 2465 municipios. Dentro de esta geoestadística, la Ciudad de México se integra por 16 demarcaciones territoriales. La entidad de Oaxaca cuenta con 570 municipios, siendo el estado con el mayor número de municipios con 20% del total nacional. Por su parte, Baja California y Baja California Sur, cuentan sólo con cinco municipios cada estado, es decir, solo el 2% del total nacional (INEGI, 2020). Un aspecto importante que se debe considerar, para el tema de escasez del criterio de disponibilidad, así como del tema de gobernanza en el criterio de gestión, es la importación y exportación de agua entre cuencas hidrográficas. También tiene impactos en el criterio de accesibilidad a los servicios y en el de protección y calidad. Un ejemplo es la Ciudad de México que recibe agua del Estado de México. En el estado de Sonora la cuenca del río Sonora recibe agua de la cuenca del río Yaqui a través del acueducto Independencia para el abastecimiento de la ciudad de Hermosillo, capital del Estado (CONAGUA, 2015).

Índice de calidad del agua

La metodología del índice de calidad del agua del GWSI, la cual hace referencia a Srebotnjak et al. (2012), consta de los siguientes pasos: 1) Selección de los parámetros de calidad del agua, 2) transformación de datos a una escala común, 3) definición de pesos relativos que se asignarán a los componentes del índice, y 4) especificación de la función de agregación. En el primer paso, los parámetros básicos de calidad del agua especificados son: Oxígeno Disuelto (OD) [mg/L], Conductividad Eléctrica (CE) [microsiemens/cm], Potencial de Hidrógeno pH [adimensional], Nitrógeno Total (N) [mg/L], y Fósforo Total (P) [mg/L]. En el primer paso se refiere a la selección de cinco parámetros que se retoman del Índice de Calidad del Agua (WATQI) que integra el Índice de Desempeño Ambiental (EPI, por sus siglas en inglés) 2008, y su aplicación a partir de las bases de datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y de la Agencia Ambiental Europea (EEA) como se refiere en (Srebotnjak et al., 2012; Esty et al., 2008 y UN Water-UNEP, 2018). En el segundo paso, los datos crudos de cada parámetro obtenidos de la estación de monitoreo se convierten a una escala libre de proximidad a los valores objetivo que se indican en la Tabla 3, de manera que un valor de proximidad de 100 corresponde a alcanzar el objetivo, o se encuentra dentro del rango objetivo como en el caso de pH, caso contrario si se tiene un valor cercano a 0 no se cumple el rango objetivo. La ecuación de transformación (normalización) de los parámetros de Oxígeno Disuelto, Conductividad Eléctrica y pH, se establecen en la Ecuación (1), Ecuación (2) y Ecuación (3) respectivamente. Las ecuaciones de los parámetros faltantes se pueden consultar en la fuente indicada (Srebotnjak et al., 2012). En los pasos 3 y 4 de ponderación y agregación de los componentes del índice, los valores de proximidad al objetivo a nivel de estación se suman y se dividen entre cinco, dando el mismo peso a los parámetros, para generar un nivel de calidad del agua de estación que oscile entre 0 y 100. Los índices obtenidos a nivel estación se promedian para obtener un índice a nivel país. Éste se ajusta conforme a la densidad de estaciones de monitoreo: ≥ 1 estación/1000 km² se multiplica por 1.00; 0.1-0.99 estaciones/1000 km² por 0.95; 0.01-0.099 estaciones/1000 km² por 0.90; 0.001-0.0099 estaciones/1000 km² por 0.85; < 0.001 estaciones/1000 km² por 0.80. Finalmente, se refiere la aplicación de un método para manejar datos faltantes, más refinado que el empleado en el índice de calidad del agua del EPI 2008 (Srebotnjak, et al., 2012).

Tabla 3 | Objetivos de desempeño de los parámetros seleccionados EPI WATQ1. Fuente (Srebotnjak et al., 2012).

Parámetro	Unidad	Objetivo	Detalles
Oxígeno disuelto	mgL ⁻¹	≥9.5	OD no debe ser menor al objetivo cuando las temperaturas medias del agua ≤20 °C
		≥6	OD no debe ser menor al objetivo cuando las temperaturas medias del agua >20 °C
pH		6.5-9.0	pH debe caer dentro del rango objetivo
Conductividad eléctrica	µScm ⁻¹	≤500	Conductividad no debe exceder objetivo
Nitrógeno total	mgL ⁻¹	≤1	Nitrógeno total no debe exceder objetivo
<i>Nitrógeno inorgánico disuelto</i>	mgL ⁻¹	≤0.5	Nitrógeno inorgánico disuelto no debe exceder objetivo
<i>Nitrato + nitrito</i>	mgL ⁻¹	≤0.5	Nitrato + nitrito no debe exceder objetivo
<i>Amonio</i>	mgL ⁻¹	≤0.05	Amonio no debe exceder objetivo
Fósforo total	mgL ⁻¹	≤0.05	Fósforo total no debe exceder objetivo
<i>Orto fosfato</i>	mgL ⁻¹	≤0.025	Orto fosfato no debe exceder objetivo

$$DO_{ij}^{PTT} = \begin{cases} 100, DO_{ij} \geq t^{DO} \\ 100 - 100x \frac{|t^{DO} - DO_{ij}|}{t^{DO} - DO_{min}}, DO_{ij} < t^{DO} \end{cases} \quad (1)$$

$$EC_{ij}^{PTT} = \begin{cases} 100, EC_{ij}^w \leq t^{EC} \\ 100 - 100x \frac{|t^{EC} - EC_{ij}^w|}{EC_{max}^w - t^{EC}}, EC_{ij}^w < t^{EC} \end{cases} \quad (2)$$

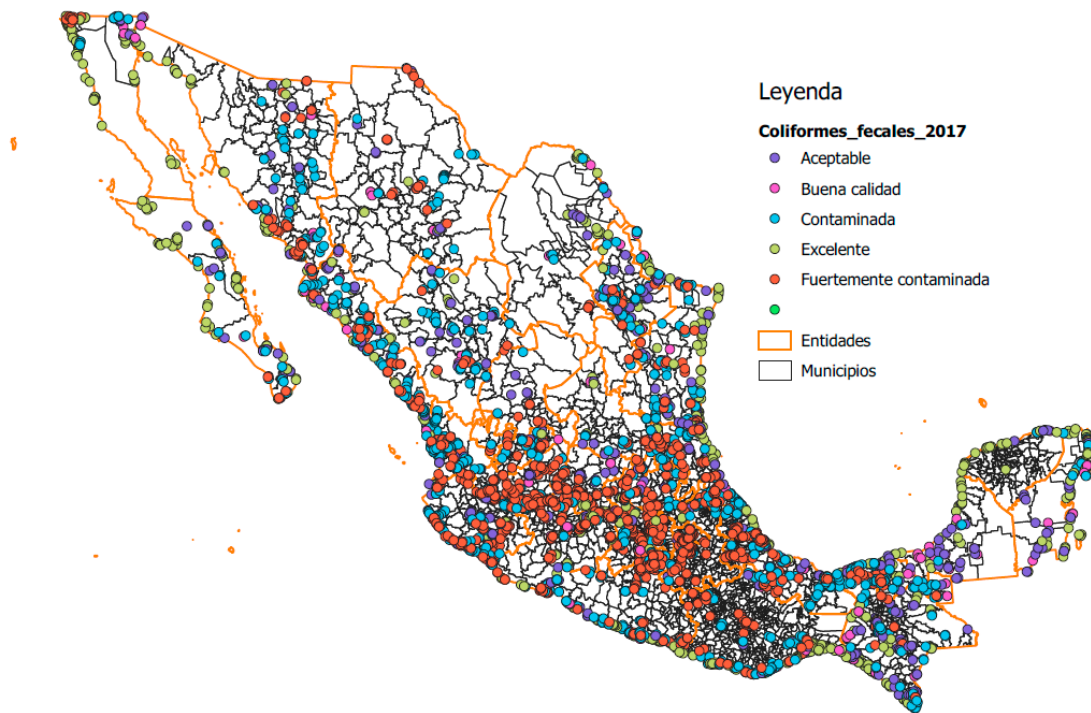
$$PH_{ij}^{PTT} = \begin{cases} 100, t_1^{PH} \leq PH_{ij} \leq t_2^{PH} \\ 100 - 100x \frac{t_1^{PH} - PH_{ij}}{t_1^{PH} - PH_{min}}, PH_{ij} < t_1^{PH} \\ 100 - 100x \frac{PH_{ij} - t_2^{PH}}{PH_{max} - t_2^{PH}}, PH_{ij} > t_2^{PH} \end{cases} \quad (3)$$

Donde PTT (Proximity To Target) indica el valor de la estación de proximidad al objetivo; los subíndices i y j , denotan el país y la estación respectivamente, y max o min , el máximo o mínimo observado por el país i y la estación j , y t denota el valor objetivo de un parámetro (Srebotnjak et al., 2012).

Por otra parte, en México la Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2017) cuenta con una red de monitoreo de calidad del agua, con 4999 estaciones al año 2015, ubicadas en todo el país (ver Tabla 4). Al año 2020 se refiere la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, con 4,210 sitios en ríos, arroyos, lagos, lagunas, presas y zonas costeras, así como 2,059 sitios en agua subterránea (CONAGUA, 2020a). Los parámetros que se monitorean de manera sistemática son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Coliformes Fecales (CF); los tres primeros disponibles oficialmente a partir del 2006, el cuarto a partir de 2015, y el quinto a partir del año 2017. De este último se presentan resultados en la Figura 4, mostrando fuerte contaminación. Actualmente se tiene también publicada información de Indicadores de Calidad del Agua Subterránea 2012-2018 y 2019, que incluyen alcalinidad, conductividad, metales pesados, sólidos disueltos totales (riego agrícola) y otros parámetros. Asimismo de Indicadores de Calidad del Agua Superficial 2012-2018 y 2019, con parámetros adicionales a los cinco mencionados, aunque no se indican metales pesados y otros contaminantes industriales y de drenajes agrícolas (CONAGUA, 2020a) (CONAGUA, 2020b).

Tabla 4 | Sitios de la red nacional de monitoreo (2015). Fuente: (CONAGUA, 2017).

Red	Área	Número de sitios de monitoreo
Superficial	Superficial	2,706
Subterránea	Subterránea	1,065
Estudios Especiales	Cuerpos de agua superficiales	32
Descargas	Subterráneas	9
	Superficiales	267
Costeros	Costeros	920
Total		4,999

**Figura 4** | Monitoreo de CF en estados y municipios. Elaboración propia con información de (CONAGUA, 2017) e (INEGI, 2019).

En la Tabla 5 se presentan las escalas de clasificación anual de calidad del agua de acuerdo con los cinco parámetros y valores objetivo (CONAGUA, 2017; CONAGUA, 2018b). En la Tabla 6 y de la Figura 5 a la Figura 8 se muestran los promedios estatales de DBO₅, DQO, SST y SDT de los registros del año 2015, considerando que la evaluación del GWSI utiliza datos del 2015 y anteriores (Gain et al., 2016), y asimismo que la línea base de los indicadores de los ODSs corresponde principalmente a ese año (UN, 2018), con lo cual los resultados son más comparables. Conforme a la clasificación de la Tabla 5, a excepción de DQO, los parámetros de calidad están clasificado con poca contaminación; caso contrario son las CF en donde sí hay contaminación biológica.

Tabla 5 | Escalas de clasificación del agua. Fuente: Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2018b)

Clasificación de calidad	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	CF (NMP/100 mL)
Excelente (dulce SDT), valores objetivo	≤ 3	≤ 10	≤ 25	≤ 1000	≤ 100
Buena Calidad	>3 y ≤ 6	>10 y ≤ 20	>25 y ≤ 75		>100 y ≤ 200
Aceptable (ligeramente salobre SDT)	>6 y ≤ 30	>20 y ≤ 40	>75 y ≤ 150	1000-2000	>200 y ≤ 1000
Contaminada (salobre SDT)	>30 y ≤ 120	>40 y ≤ 200	>150 y ≤ 400	2000-10000	>1000 y ≤ 10000
Fuertemente contaminada (salina SDT)	>120	>200	>400	Mayor 10000	>10000

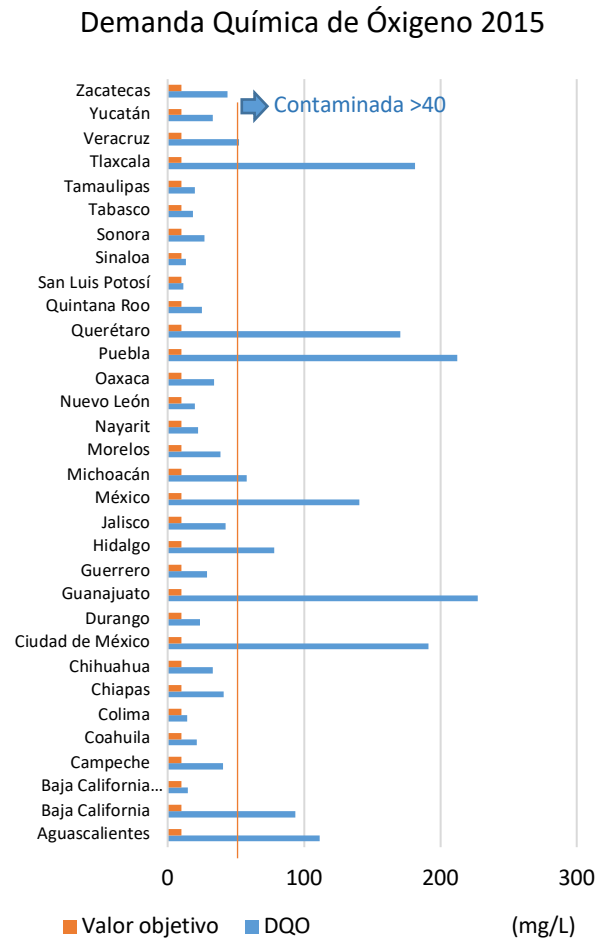
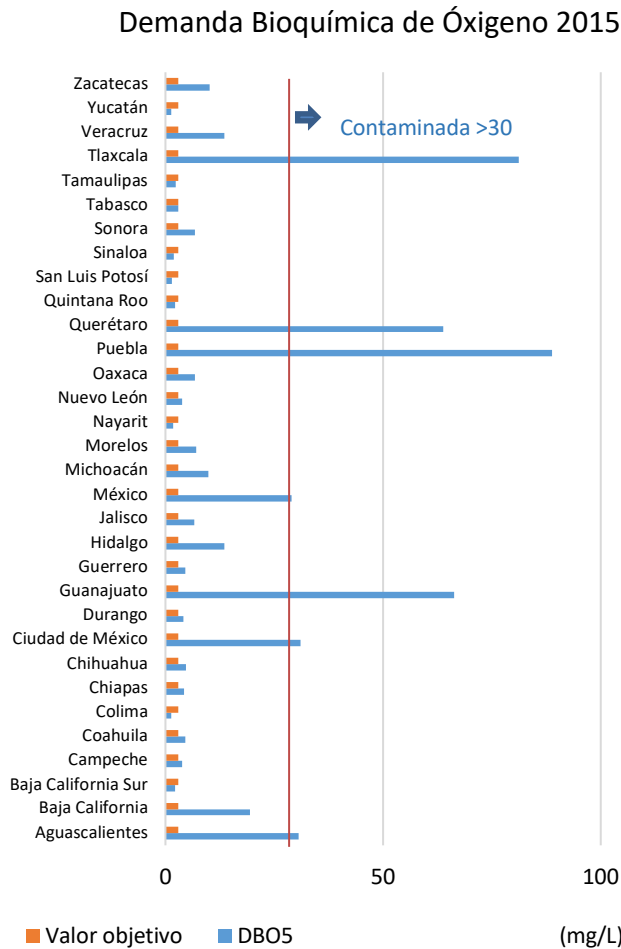


Figura 5 | Promedio estatal de DBO₅ 2015. Excelente ≤ 3, contaminada >30 y ≤120. Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2016c).

Figura 6 | Promedio estatal de DQO 2015. Excelente ≤ 10, contaminada >40 y ≤200. Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2016c).

Tabla 6 | Promedios estatales de DBO₅, DQO, SST y SDT de los registros del año 2015 (CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2016c).

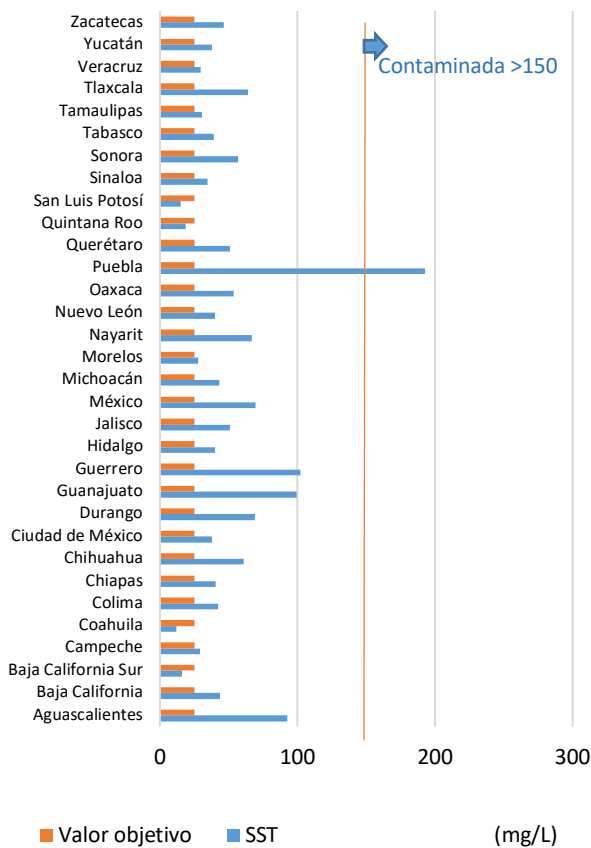
Entidad	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
Aguascalientes	30.6	111.4	92.72	443.1
Baja California	19.4	93.5	43.78	2720
Baja California Sur	2.2	14.6	15.84	1107.4
Campeche	3.8	40.5	28.94	1483.6
Coahuila	4.6	21.5	11.92	1254.9
Colima	1.4	14.5	42.37	588.5
Chiapas	4.2	41.2	40.28	285.8
Chihuahua	4.7	32.9	60.8	990.3
Ciudad de México	31.1	191.5	37.78	350
Durango	4.1	23.5	68.86	601.5
Guanajuato	66.3	227.4	99.2	664.6
Guerrero	4.5	28.7	102.14	429.2
Hidalgo	13.5	78.1	40.08	809.7
Jalisco	6.6	42.5	50.94	331.3
México	28.9	140.8	69.58	586.6

(Tabla 6, continúa en la página siguiente)

(Tabla 6, continúa de la página anterior)

Entidad	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
Michoacán	9.8	57.8	43.15	357.9
Morelos	7.1	38.6	27.84	531.4
Nayarit	1.7	22.4	66.94	331.4
Nuevo León	3.9	19.8	40.06	1437
Oaxaca	6.8	34	53.41	484.1
Puebla	88.8	212.6	192.58	882.7
Querétaro	63.8	170.5	51.09	355.3
Quintana Roo	2.2	25.3	18.91	1536.5
San Luis Potosí	1.5	11.3	15.02	595
Sinaloa	1.9	13.6	34.6	602.9
Sonora	6.7	26.8	56.71	1105.5
Tabasco	2.9	18.7	39.11	384.6
Tamaulipas	2.3	20.1	30.61	1572.1
Tlaxcala	81.2	181.4	63.84	337.8
Veracruz	13.6	52.3	29.82	648.8
Yucatán	1.4	32.9	37.7	783.5
Zacatecas	10.1	44	46.44	658.5

Sólidos Suspendedos Totales 2015



Sólidos Disueltos Totales 2015

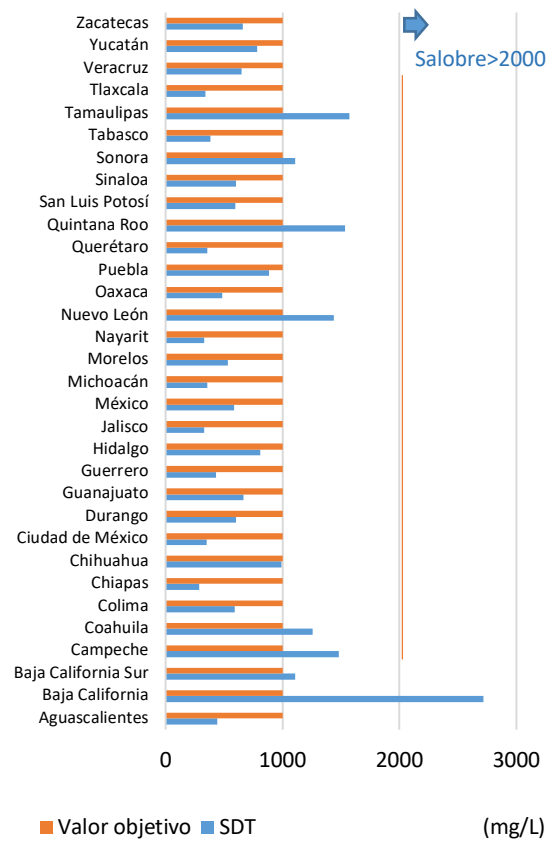


Figura 7 | Promedio estatal de SST 2015. Excelente ≤ 25, contaminada >150 y ≤400. Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2016c).

Figura 8 | Promedio estatal de SDT 2015. Dulce ≤ 1000, salobre de 2000 a 10000. Elaboración propia con datos de (CONAGUA, 2018b; CONAGUA, 2016c).

En la Tabla 7 se muestra un resumen de información del índice de calidad del agua WATQI empleado en el GWSI, así como del Indicador 6.3.2 de ODS, y de los parámetros de calidad del agua disponibles en México. El índice WATQI aplicado a nivel país en el EPI 2008 presenta un valor para México de 70.97 de acuerdo con Srebotnjak et al. (2012); aplicado en el GWSI presenta resultados en una escala espacial de 5 min (Gain et al., 2016). En cuanto al indicador 6.3.2, en su aplicación se ha identificado la necesidad de incluir el monitoreo de parámetros microbiológicos y de metales pesados, en al menos 25% de países encuestados (UN, 2018). De todo esto la propuesta ideal es aplicar el indicador 6.3.2 complementado con parámetros microbiológicos y de metales pesados, en una escala espacial como la aplicada en el GWSI.

Tabla 7 | Comparativa de parámetros de calidad del agua en alternativas consideradas de Índice. Fuente: Elaboración con datos de Srebotnjak, et al. (2012); Gain et al. (2016); UN (2018); CONAGUA (2017).

Aspectos	Índice WATQI, GWSI	Indicador 6.3.2 ODS 6	Datos oficiales de México
Parámetros	Oxígeno disuelto	Oxígeno disuelto	DBO ₅
	pH	pH	DQO
	Conductividad eléctrica	Conductividad eléctrica	SST
	Nitrógeno total	Nitrógeno total	SDT
	Fósforo total	Fósforo total	CF
		Parámetros Microbiológicos (encuesta)	Indicadores de Calidad del Agua Superficial 2012-2018
		Metales pesados (encuesta)	Indicadores de Calidad del Agua Subterránea 2012-2018
Escala espacial	WATQI nivel país GWSI pixeles de 5 min	Nivel país	Por estación de monitoreo
Otros aspectos	WATQI EPI 2008 de México 70.97	Considera un segundo nivel de monitoreo de parámetros.	

Índice de frecuencia de inundaciones

Respecto a la metodología y fuente de información para el índice de inundaciones, establecida por Gain et al. (2016) donde refiere al uso de la frecuencia de eventos de inundación registrados a escala país en el periodo 1985-2003, de los siguientes centros de investigación: a) Centro de Investigación de Peligros y Riesgos (CHRR) de la Universidad de Columbia y b) Centro de la Universidad de Columbia para la Red Internacional de Información de Ciencias de la Tierra (CIESIN). Para el proceso de generación de resultados de la Frecuencia y Distribución Global de Peligro de Inundación en el país, se realiza mediante una cuadrícula de 2.5 minutos, resultando 10 clases de aproximadamente el mismo número de celdas de cuadrícula, de modo que cuanto mayor sea el valor de la celda de la cuadrícula en el conjunto de datos final, mayor será la frecuencia relativa de ocurrencia de la inundación (CHRR/SIESIN, 2005).

Para el análisis estatal se cuenta con los registros de eventos hidrometeorológicos del Servicio Meteorológico Mexicano (SMN, 2020) y el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA, 2020a) de la CONAGUA, así como la frecuencia de declaratorias de emergencia para dichos eventos por municipio, que se monitorean anualmente a partir del año 2000 (SINA, 2020b). Para la emisión de declaratorias ante estos fenómenos en México se tiene un procedimiento del Fondo para la Atención de Emergencias (FONDEN) de la Secretaría de Gobernación (SEGOB-SINAPROC, 2018). Ante la presencia de un fenómeno perturbador las Entidades Federativas (Estados) solicitan declaratoria de Emergencia a la Coordinación General de Protección Civil, enviando información relevante sobre los efectos en la población afectada. La Coordinación solicita dictamen de corroboración a la instancia técnica facultada, que para fenómenos hidrometeorológicos es la CONAGUA, que emite un dictamen técnico en el que se confirma o no la existencia del fenómeno perturbador (SEGOB-SINAPROC, 2018). Asimismo el CENAPRED dispone de registros anuales de las afectaciones causadas por los desastres correspondientes, en número de fallecimiento y pérdidas económicas, necesarios para aplicar los indicadores 11.5.1 y 11.5.2 (UNDRR, 2019; ONU, 2018; CENAPRED, 2019; Martínez Austria et al., 2019). En la Figura 9 se muestra el mapa nacional de declaratorias municipales de emergencia por fenómenos hidrometeorológicos 2000-2016 (CONAGUA, 2016c). En la Figura 10, se muestra el número de declaratorias por estado, en el que se puede observar que los cinco Estados con más declaratorias son Veracruz (4,457), Oaxaca (2,444), Chiapas (1,071), Chihuahua (1,030) y Puebla (892). Al dividir entre el periodo de registro y el número de municipios, el más alto resulta ser Baja California sur, con cerca de dos declaratorias anuales por municipio.

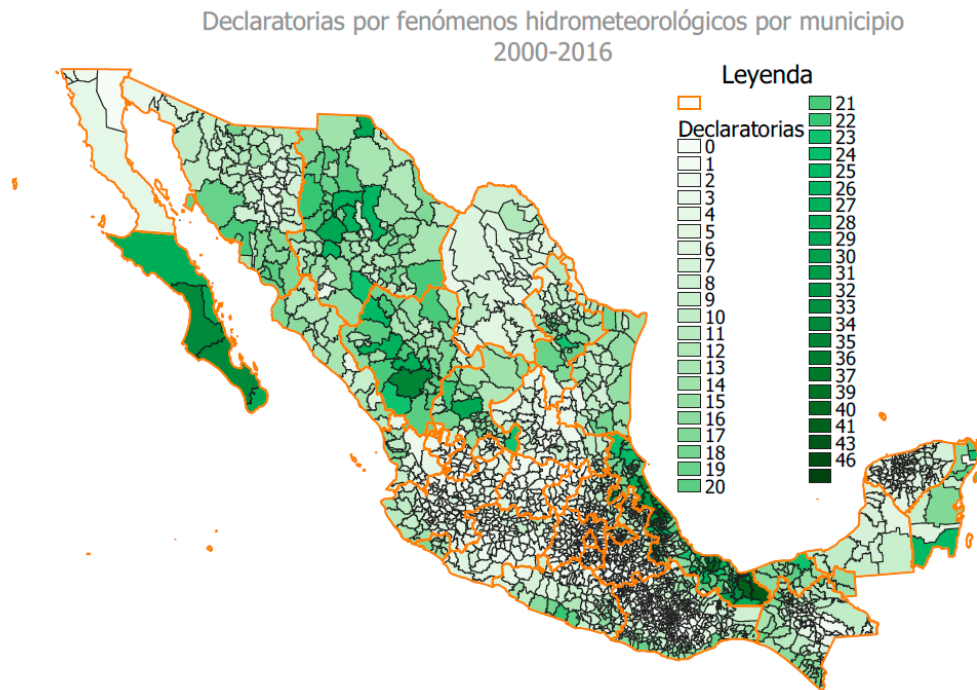


Figura 9 | Declaratorias hidrometeorológicas por municipio del 2000 al 2016. Elaboración propia con información de CONAGUA (2017) e INEGI (2019).

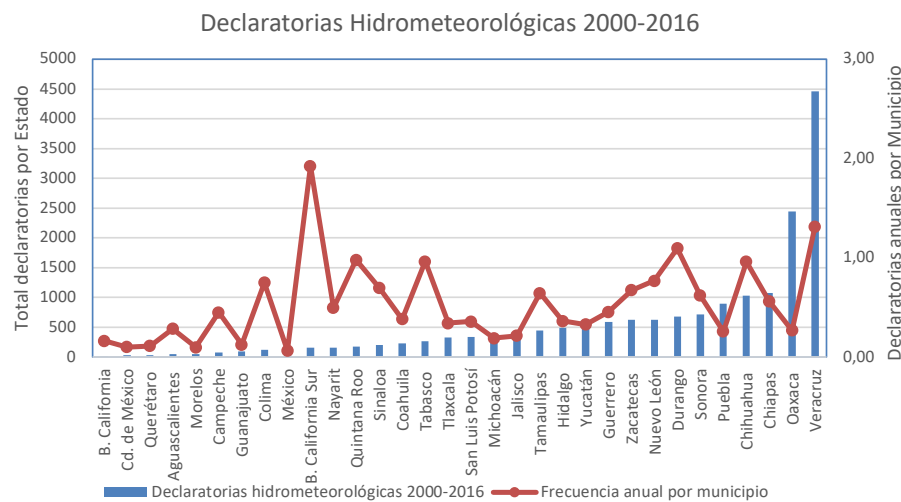


Figura 10 | Total de declaratorias hidrometeorológicas por Estado 2000-2016. Elaboración propia con información de CONAGUA (2017).

En la Tabla 8 se muestra un resumen de datos del índice de protección empleado en el GWSI, así como de los indicadores 11.5.1 y 11.5.2 de los ODS, y de los eventos hidrometeorológicos e información disponibles en México. Se cuenta entonces con la información sistemática para aplicar los indicadores 11.5.1 y 11.5.2 ODS para todo tipo de desastres y los relacionados con el agua, y el índice de protección de GWSI, pero también para plantear un índice más completo que incluya registros de inundaciones, declaratorias de emergencia, fallecimientos y pérdidas económicas, en una escala espacial como la del GWSI, para el monitoreo estatal y nacional de los avances de los ODS's.

Tabla 8 | Comparativa de parámetros de protección ante inundaciones en alternativas consideradas de Índice de Protección. Fuente: Elaboración propia con datos de Gain et al. (2016), UN (2018), CONAGUA (2016c) y CENAPRED (2019).

Aspectos	Índice de protección, GWSI	Indicadores 11.5.1 y 11.5.2	Datos oficiales públicos de México
Parámetros	Frecuencia de eventos de inundación a escala país registrados en el periodo 1985-2003 (CHRR)	-Número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100,000 personas. -Pérdidas económicas directas en relación con el PIB mundial, daños en la infraestructura crítica y número de interrupciones de los servicios básicos atribuidos a desastres”.	-Registros de inundaciones y demás eventos hidrometeorológicos. -Declaratorias de emergencia por estos fenómenos a nivel Municipio. -Registros anuales de fallecimientos y de pérdidas económicas debido a los mismos, con declaratoria de emergencia.
Escala espacial	CHRR nivel país, 2.5 min GWSI pixeles de 5 min	Nivel país	Por municipio

Aplicación con datos disponibles 2015

En una siguiente etapa de este trabajo se preparará la información para aplicar el planteamiento propuesto para el índice de calidad del agua, y el índice de protección contra inundaciones. En esta etapa se hicieron determinaciones estatales preliminares, como un primer ejercicio. Se propuso o se aplicó el índice estatal de calidad con los siguientes parámetros: DBO₅, DQO, SST y SDT. Se realizó haciendo la normalización correspondiente y su agregación según lo descrito en las secciones del Índice de Calidad del Agua (WATQI). El índice de protección se propuso o se aplicó mediante los registros de declaratorias de emergencia por fenómenos hidrometeorológicos del periodo 2000 al 2016, de cada Estado (ver Figura 9 y Figura 10). La normalización se realizó con el método de proximidad a valores objetivo. Finalmente, se hizo la agregación de los dos índices para obtener el índice de calidad y protección, considerando el mismo peso de ponderación para ambos.

Como ya se ha descrito, la metodología de Gain et al. (2016) refiere el uso de métodos multicriterio espaciales (MCA) con una ponderación aditiva simple (SAW) y un promedio ponderado ordenado (OWA) de los valores normalizados de cada indicador, para evitar el efecto compensatorio de valores altos y bajos. Asimismo, aunque de inicio estos dos índices tienen subjetivamente el mismo peso, como se muestra en la Figura 2, con el enfoque de OWA se realiza una segunda ronda de ponderación a la secuencia ordenada de valores previamente ponderados. En futuros cálculos se evaluará la aplicación de SAW, OWA, y la media geométrica, que es menos sensible a valores extremos y que se recomienda para el caso de índices. Además, como recomienda Gain et al. (2016), se propondrá realizar reuniones de validación con expertos locales, que puedan proponer ajustes diversos, entre éstos a las ponderaciones de cada criterio y sus indicadores.

RESULTADOS

- Se obtuvo un promedio estatal preliminar del índice de calidad del agua (Figura 11) y del índice de protección (Figura 12), y de éstos el índice de protección y calidad, de ≈ 0.6 (Figura 13), con información oficial disponible, que muestra una aproximación a la situación actual de contaminación del agua y de la protección contra inundaciones a nivel nacional. Para la misma situación el valor promedio del índice respectivo del GWSI fue ≈ 0.33 , que es más desfavorable para México en Seguridad Hídrica, y cuya integración fue contrastada con la de los indicadores 6.3.2, 11.5.1 y 11.5.2, de donde se prevén futuras aplicaciones para obtener resultados más certeros.
- El componente de calidad del agua del GWSI está basado en el índice WATQI, del Índice de Desempeño Ambiental (EPI), que en 2008 presentó un valor de calidad del agua para México de 70.97, en escala de 0 a 100 donde 0 significa una pésima calidad del agua y 100 la mejor calidad posible del agua; como referencia, los valores más altos fueron los de Nueva Zelanda (99.41), y Finlandia (99.06) (Srebotnjak et al., 2012).
- La comparación de resultados del GWSI para México muestra la necesidad de revisar algunos datos, así como agregar algunos parámetros para su aplicación local, según los indicadores del ODS 6 y del ODS 11. Sin embargo, también muestran que es una alternativa de tipo estratégico para evaluar en cada país la Seguridad Hídrica, y el avance de las metas respectivas de los ODS's.

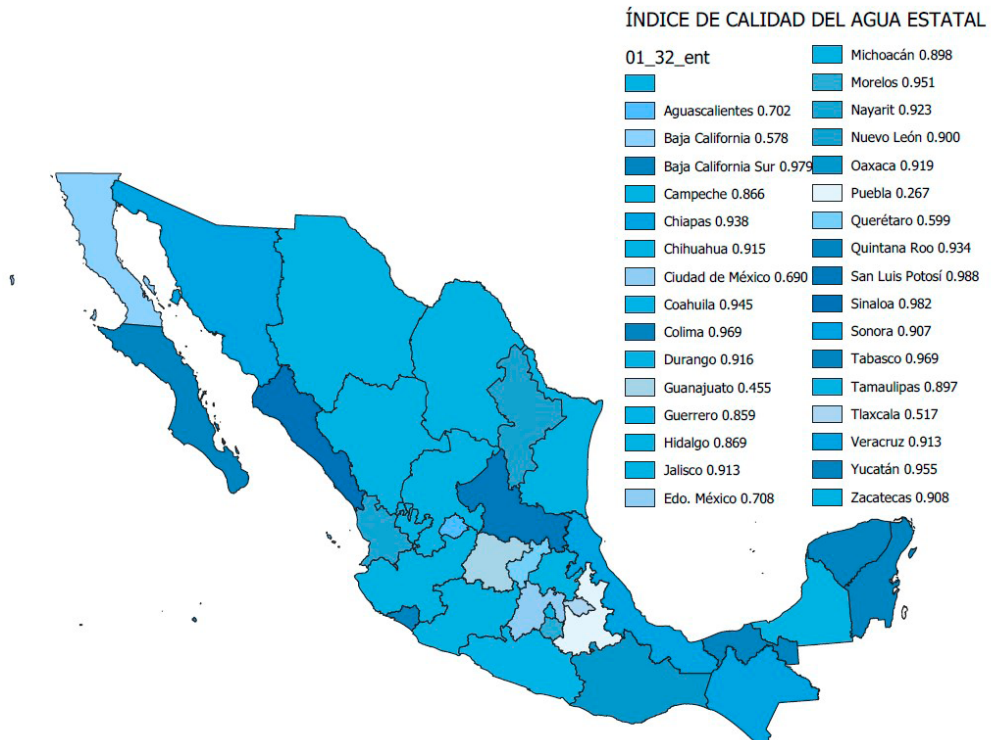


Figura 11 | Índice estatal de calidad considerando DBO₅, DQO, SST y SDT como parámetros de calidad del agua. Elaboración propia con datos de CONAGUA (2017) e INEGI (2019).



Figura 12 | Índice estatal de protección, considerando declaratorias por fenómenos hidrometeorológicos como criterio de protección contra inundaciones. Elaboración propia con datos de CONAGUA (2017) e INEGI (2019).

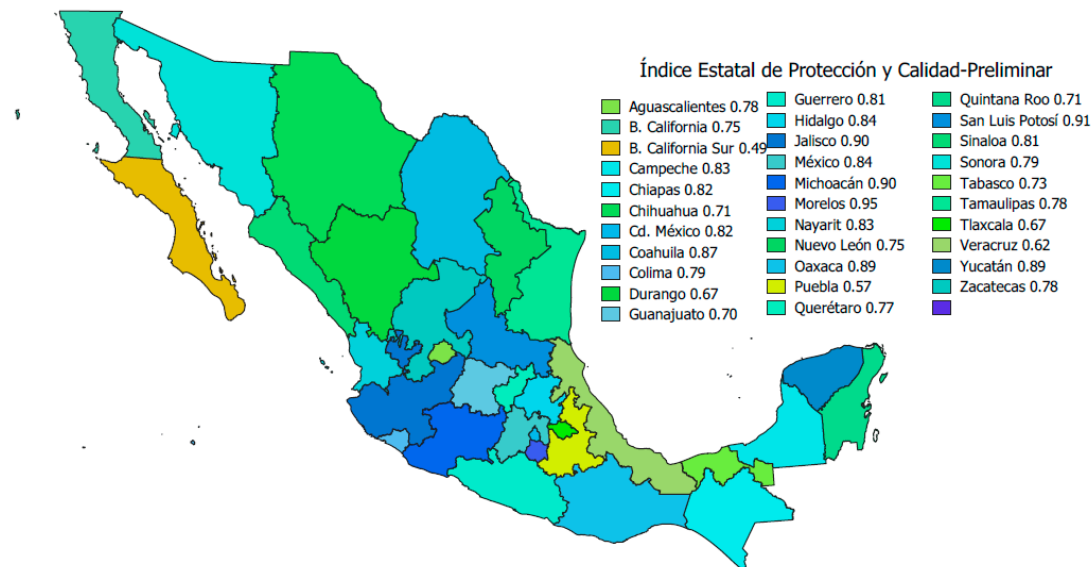


Figura 13 | Índices estatales de calidad y protección, considerando DBO₅, DQO, SST y SDT como parámetros de calidad del agua, y declaratorias por fenómenos hidrometeorológicos como criterio de protección contra inundaciones. Elaboración propia con datos de CONAGUA (2017) e INEGI (2019).

DISCUSIÓN

La seguridad hídrica de México presenta valores medios (≈ 0.5), comparada con otros países a nivel mundial. El componente con valores más bajos corresponde a la de calidad y protección (≈ 0.33), por lo que principalmente requiere atención prioritaria. La limitante del agua renovable per cápita en el país ($3656 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ al año 2017), así como cuestiones de tipo socioeconómico y de gobernanza, causan que la demanda del recurso hídrico en varias regiones supere a la oferta de equilibrio, ocasionando su sobreexplotación y contaminación, debido también a una insuficiente cobertura de tratamiento de aguas residuales. Asimismo, en general la insuficiente capacidad de protección y resiliencia ante inundaciones, debidas a la variabilidad espacial y temporal de los procesos del ciclo hidrológico y sus valores extremos, ocasiona importantes pérdidas de vidas humanas y económicas. Dadas las facultades que los municipios y los estados tienen al respecto, la Seguridad Hídrica Nacional pasa mucho por su desempeño, por lo que se tienen que fortalecer sus capacidades funcionales. Principalmente de los municipios, de los que dependen los servicios de agua potable y saneamiento, para que al alcanzar su cobertura universal, manejados de manera segura, se contribuya con el ciclo integral del agua en el uso público urbano, manteniendo la circulación mediante su uso y devolución al medio en las mejores condiciones de calidad posibles, con el fin de que pueda seguir siendo utilizada.

Sobre las alternativas para medir la calidad del agua y la protección contra inundaciones, como resultado de la ejecución de acciones para su mejora, entre las que se encuentran los indicadores del GWSI propuesto por (Gain et al., 2016), éste se basa en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 11, que incluyen metas e indicadores de Seguridad Hídrica para todo el ciclo hidrológico. El indicador de calidad del agua del GWSI al igual que el indicador 6.3.2, retoma los cinco parámetros del Índice de Calidad del Agua (WATQI) incluido en el Índice de Desempeño Ambiental (EPI) 2008 (Srebotnjak, et al., 2012). En las primeras aplicaciones del indicador 6.3.2 se determinó que el 25 por ciento de los participantes consideró que además de los cinco parámetros WATQI, debiera incluir parámetros microbiológicos y metales pesados, para caracterizar la calidad del agua de sus países, que sería también el caso de México, y para lo cual el indicador 6.3.2 tiene previsto un segundo nivel de monitoreo progresivo de parámetros, que depende de los diferentes usos del agua (UN Water–UNEP, 2018; Martínez Austria et al., 2019). Se debe considerar además que

conforme a la propia ONU, los indicadores de los ODSs pueden complementarse con indicadores nacionales, regionales y temáticos adicionales (UN, 2018), que es lo que pretende la aplicación Estatal propuesta en este trabajo.

Por cuanto al indicador de protección contra inundaciones del GWSI, éste se basa en la frecuencia global de inundaciones, que evalúa indirectamente las afectaciones debido a estos desastres. Sin embargo en el ODS 11 éstas se evalúan de forma directa mediante los indicadores 11.5.1 “Número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100 000 personas”, y el 11.5.2 “Pérdidas económicas directas en relación con el PIB mundial, daños en la infraestructura crítica y número de interrupciones de los servicios básicos atribuidos a desastres” (UNDRR, 2019; UN, 2018). El CENAPRED registra datos como los implícitos en estos indicadores (CENAPRED, 2019; Martínez Austria et al., 2019), por lo que sería viable su aplicación Estatal.

Por lo anterior, se planteó para siguientes evaluaciones la adaptación y aplicación de indicadores estatales y municipales de calidad del agua y de protección contra inundaciones, que integren parámetros microbiológicos y metales pesados, y que evalúen directamente las afectaciones en decesos y pérdidas económicas, respectivamente. Esto para evaluar más claramente las políticas públicas y programas presupuestarios municipales y estatales, aplicados a la Seguridad Hídrica de sus territorios y poblaciones, como una contribución al cierre de brechas de gobernanza multinivel del sector agua de México.

En ésta etapa de trabajo se hicieron determinaciones estatales preliminares, considerando datos públicos disponibles de DBO₅, DQO, SST y SDT del año 2015 para el Índice de Calidad del Agua, y para el Índice de Protección mediante los registros de declaratorias de emergencia por fenómenos hidrometeorológicos del 2000 al 2016, de todos los municipios de cada Estado. Sin embargo, los resultados se deben mejorar con la integración de los datos que se describen en los párrafos anteriores.

Por otra parte, se deben analizar los pesos de los cuatro criterios que conforman la Seguridad Hídrica. El de gestión impacta mucho en México. La ponderación utilizada es subjetiva, por lo tanto es conveniente su validación en cada uno de los Estados, con expertos locales. Aunque es claro que la disponibilidad debe tener el mayor peso, también es cierto que la gestión del recurso hídrico impacta en su preservación, y por lo tanto, debe discutirse si un peso de manejo del 15% es adecuado para integrarlo. En este aspecto, el GWSI presenta un valor medio de seguridad hídrica para México de ≈ 0.5 , con un valor mayor de seguridad en el norte del país y un valor menor para la región sur, lo cual puede ser discutible dada la gran diferencia en disponibilidad entre ambas regiones, con amplia ventaja para la segunda. Asimismo, junto a lo anterior, realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la capacidad del índice de ser robusto independientemente de la elección de los pesos.

CONCLUSIONES

La situación del agua en México, requiere de todo aquello que pueda contribuir a lograr la sostenibilidad del recurso hídrico, para revertir la sobreexplotación y contaminación, e incrementar la protección contra inundaciones. Asimismo para alcanzar los objetivos de la Agenda 2030. Este estudio ha demostrado que es posible mejorar el monitoreo de la seguridad hídrica de México, en sus componentes de calidad del agua y de protección contra inundaciones, que por los niveles en que se encuentran son prioritarios de mejorar. Esto con el fin de coadyuvar en la planificación de los programas presupuestarios del sector en los tres niveles de gobierno, y asimismo en su evaluación y seguimiento.

De esta manera se contribuye con el componente de gestión de la seguridad hídrica, y en cierta medida con los de disponibilidad del recurso y de accesibilidad a los servicios, estando los cuatro componentes interrelacionados. Existe información oficial pública para hacerlo, conforme a los indicadores ODS, como la recopilada y procesada en el estudio. Es un proceso de aprendizaje, de revisión y mejora, selección de indicadores, recopilación de datos y metodologías.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por el apoyo proporcionado para realizar este trabajo mediante el desarrollo de un proyecto interno.

REFERENCIAS

- ACNUDH. 2020. *Naciones Unidas, Derechos Humanos, Oficina del Alto Comisionado*. Obtenido de Declaración de final de misión del Relator Especial sobre los derechos humanos al agua y al saneamiento, Sr. Léo Heller: <https://www.ohchr.org/SP/NewsEvents/Pages/DisplayNews.aspx?NewsID=21608&LangID=S> (10 de Junio de 2020).
- ASF. 2018. *Objetivos de Desarrollo Sostenible, Fiscalización de la agenda 2030, Elementos para una planeación de Mediano Plazo, Resumen Ejecutivo*. México: Auditoría Superior de la Federación.
- CENAPRED. 2019. *Impacto socioeconómico de los principales desastres-Resumen Ejecutivo 2018*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CHRR/SIESIN. 2005. *Global Flood Hazard Frequency and Distribution*. Palisades, NY: Center for Risk Research and Center for International Earth Science Information Network.
- CONAGUA. 2014. *Programa Nacional Hídrico 2014 - 2018*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 2015. *Reordenamiento de la cuenca del río Sonora, con la identificación de los usos principales de agua y mediante el establecimiento de metas de aprovechamiento de cada uso, alternativas y estrategias para implantar el uso eficiente del recurso, priorizando...* México: CONAGUA.
- CONAGUA. 2016a. *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Edición 2016*. México, D. F.: D. R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 2016b. *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 2016c. *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Declaratorias por fenómenos hidrometeorológicos (nacional): <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=declaratoriasFenomenos&ver=mapa>
- CONAGUA. 2017. *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*. Obtenido de Calidad del agua (nacional): <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua&ver=mapa&o=1&n=nacional> (14 de Diciembre de 2017).
- CONAGUA. 2018a. *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- CONAGUA. 2018b. *SINA*. Obtenido de Sistema nacional de información del agua: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua&ver=mapa&o=2&n=nacional>
- CONAGUA. 2020a. *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Indicadores de Calidad del Agua 2012- 2019: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/mapas/Calidaddelagua.pdf>
- CONAGUA. 2020b. *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Indicadores de Calidad del Agua Subterránea 2012-2018: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/calidadAguaSub.php> (04 de Abril de 2020).
- CONEVAL. 2017. *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*. Obtenido de Ficha de monitoreo de políticas sociales-Programa Nacional Hídrico 2014-2018-Resumen del Programa: https://www.coneval.org.mx/coordinacion/Documents/monitoreo/Fichas_sectoriales/2017/HIDRICO.pdf
- Covarrubias, S.A., Peña, C.J. 2017. Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Irapuato, Guanajuato. México.
- Daza, S.F. 2008. Demanda de agua en zonas urbanas en Andalucía. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba: www.uco.es/publicaciones.
- Esty, D.C., Levy, M.A., Kim, C.H., de Sherbinin, A., Srebotnjak, T., Mara, V. 2008. *2008 Environmental Performance Index*. New Haven, CT.: Yale Center for Environmental Environmental Law & Policy.

- Gain, A.K., Wada, Y., Giupponi, C. 2016. Measuring global water security towards sustainable development. *Environmental Research Letters*, 11(12), 2-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- INEGI. 2019. *Bases de datos estadística y geográfica. Curso del Módulo 5: Agua Potable y Saneamiento*. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI. 2020. *Cuéntame*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/division/default.aspx?tema=T> (01 de Abril de 2020).
- Martínez Austria, P.F., Díaz Delgado, C., Moeller Chavez, G. 2019. Water security in Mexico: general diagnosis and main challenges. *Ingeniería del agua*, 23(2), 107-121. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>
- OCDE. 2012. *Making Water Reform Happen in Mexico, Assessment and Recommendations*. México, www.oecd.org/water.
- OCDE. 2013. *OCDE better polices for better lives*. Obtenido de México debe mejorar su gobernabilidad, financiamiento y regulación del agua, dice el Secretario General de la OCDE, Angel Gurría: <http://www.oecd.org/newsroom/mexicodebemejoraragusgobernabilidadfinanciamientoyregulaciondelaguadiceelsecretariogeneralde laocdeangelgurria.htm> (08 de 01 de 2013).
- ONU. 2017. *Objetivos del Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/> (27 de Julio de 2017).
- ONU. 2018. *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago: Naciones Unidas, (LC/G.2681-P/Rev.3).
- PNH. 2014. *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México, DF.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- PNUD. 2019. *Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2015-Transformando México desde lo local*. Ciudad de México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- SEGOB-SINAPROC. 2018. *Sistema Nacional de Protección Civil México*. Obtenido de DGGR (FONDEN): <http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Fonden> (29 de Noviembre de 2018).
- SEMARNAT. 2020. *Disponibilidad del agua*. Obtenido de http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.4_Disponibilidad/index.htm#:~:text=En%20un%20contexto%20mundial%2C%20la,superior%20al%20promedio%20de%20los (06 de Marzo de 2020).
- SHCP. 2016. *SHCP, "Guía para el diseño de indicadores estratégicos"*. Obtenido de http://www.shcp.gob.mx/EGRESOS/PEF/Documentos%20Recientes/guia_ind_estrategicos20100823.pdf (14 de Octubre de 2016).
- SINA. 2020a. *Sistema Nacional de Información del Agua-Conagua*. Obtenido de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion> (06 de Abril de 2020a).
- SINA. 2020b. *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Declaratorias por fenómenos hidrometeorológicos (nacional): <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=declaratoriasFenomenos> (06 de Abril de 2020b).
- SMN. 2020. *Servicio Meteorológico Nacional-Conagua*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/> (06 de Abril de 2020).
- Srebotnjak, T., Carr, G., Sherbinin, A.D., Rickwood, C. 2012. A global water Quality Index and hot-deck imputation of missing data. *Ecological Indicators*, 17, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.023>
- UN. 2018. *"Sustainable Development Goal 6-Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation"*. New York, New York 10017, United States of America: United Nations Publications.
- UN Water-UNEP. 2018. *Progress on Ambiente Water Quality-Piloting the monitoring methodology and initial findings for SDG indicator 6.3.2*. UN Environment on behalf of UN-Water.
- UNDRR. 2019. *UNDRR UN Office for Disaster Risk reduction*. Obtenido de The Sendai Framework and the SDGs: <https://www.unisdr.org/we/monitor/indicators/sendai-framework-sdg> (18 de Diciembre de 2019).

UNEP. 2019. *Measuring Progress: Towards Achieving the Environmental Dimension of the SDGs*. Nairobi: United Nations Environment Programme.

UN-Water. 2013. *Water security and the global water agenda. A UN-Water Analytical Brief*. Hamilton, Ontario L8P 0A1 Canada: United Nation University.

UN-Water. 2017. *Guía para el monitoreo integrado del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 sobre agua y saneamiento. Metas e indicadores mundiales*. ONU.

UN-WWAP. 2015. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*, UNESCO,. Paris: UNESCO.

WHO-UNICEF. 2019. *who-unicef JMP*. Obtenido de Drinking water: <https://washdata.org/monitoring/drinking-water> (10 de Julio de 2019).