

Caracterizando la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrológica: Caso de estudio Veracruz, México

Characterizing water security with a watershed approach: Case study Veracruz, Mexico

Andrés De la Rosa ¹, Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez ², Mariana Villada-Canela ³, Robert Manson ⁴ y Rene Murrieta-Galindo ^{5*}

¹El Colegio de Veracruz. Doctorando en Desarrollo Regional Sustentable. Carrillo Puerto 26, Zona Centro, 91000 Xalapa-Enríquez, Ver., México,

²Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Carretera Ensenada-Tijuana No. 3917, Fraccionamiento Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, México.

³Instituto de Ecología A.C. Departamento de Ecología Funcional. Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, 91703 Xalapa-Enríquez, ver., México

E-mail: ¹delarosaportilla@gmail.com, ²andrea.valdes@gmail.com, ³mvilladac@uabc.edu.mx, ⁴robert.manson@inecol.mx, ⁵murrieta13@gmail.com

*Autor para correspondencia

Recibido: 07/03/2021

Aceptado: 17/06/2021

Publicado: 31/07/2021

Citar como: De la Rosa, A., Valdés-Rodríguez, O.A., Villada-Canela, M., Manson, R., Murrieta-Galindo, R. 2021. Characterizing water security with a watershed approach: Case study Veracruz, Mexico. *Ingeniería del agua*, 25(3), 187-203. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15221>

RESUMEN

México no cuenta con un instrumento de medición de la seguridad hídrica (SH) y 47% de sus entidades federativas tienen estrés hídrico extremadamente alto. Esta investigación caracterizó y evaluó un índice de SH en Veracruz, con enfoque de cuenca hidrológica, utilizando sistemas de información geográfica para analizar variables, indicadores y dimensiones relevantes en México. Los resultados indicaron que 11 cuencas (19%) tienen una SH Alta, 21 (36%) SH Media, 20 (35%) SH Baja y 6 (10%) SH Muy baja, ninguna cuenca alcanzó la SH Muy Alta. El 77% de las cuencas presentó una disminución de agua del 2014-2020 y el indicador con los valores más bajos fue "infraestructura". En consecuencia, debe modificarse la forma de medir la disponibilidad de agua a través de un balance hídrico y una planeación estratégica en obras de infraestructura. Para otras regiones, se considera viable la réplica del índice de SH planteado.

Palabras clave | seguridad hídrica, cuenca hidrológica, sistemas de información geográfica, Golfo de México, Veracruz.

ABSTRACT

Mexico does not have an instrument to measure water security (WS) and 47% of its states have extremely high water stress. This research characterized and evaluated a WS index in Veracruz, with a hydrological basin approach, using geographic information systems to analyze variables, indicators and dimensions in Mexico. The results indicated that 11 watersheds (19%) had a High WS, 21 (36%) Medium WS, 20 (35%) Low WS and 6 (10%) Very Low WS; no watershed reached Very High WS. 77% of the basins presented a decrease of water from 2014-2020 and the indicator with the lowest value was "infrastructure". Consequently, measuring the current water availability must be modified by a water balance and making a strategic planning infrastructure. For other regions, replication of the proposed WS index is considered feasible.

Key words | water security, hydrological basin, geographic information systems, Gulf of Mexico, Veracruz.

INTRODUCCIÓN

El concepto de la seguridad hídrica (SH), definido como: “la disponibilidad de una cantidad y calidad de agua aceptable para la salud, los medios de subsistencia, los ecosistemas y la producción, junto con un nivel aceptable de riesgos asociados con el agua para las personas, el medio ambiente y las economías” (Grey y Sadoff, 2007), tiene una mayor relevancia debido a la escasez de agua que afecta a más del 40% de la población mundial, y a que cada vez son más los países que están mostrando un incremento de sequía y desertificación (UN Water, 2017). La escasez de agua sucede por diversas causas interrelacionadas, siendo algunas de las principales el cambio de uso de suelo y la deforestación, ya que, al producirse a gran escala, cambian las precipitaciones a una distancia de hasta miles de kilómetros (Requena, 2017).

En este contexto, se destacan los servicios ecosistémicos que proveen los bosques, como determinantes para reducir el riesgo de desastres por fenómenos naturales (Wahlstrom, 2015) y mitigar con ello la generación de éstos fenómenos, puesto que se ha documentado que un mayor número de bosques significará una menor y menos destructiva cantidad de ciclones (Makarieva et al., 2013). Además, los bosques contribuyen sustancialmente al equilibrio hidrológico en la cuenca, donde una de sus mayores aportaciones es mantener la calidad del agua y prevenir inundaciones (FAO, 2013). Por otro lado, la pérdida de los recursos forestales contribuye al cambio climático, de forma tal que permite el aumento en la temperatura global (Bates et al., 2008).

A su vez, el cambio climático y sus efectos repercuten sobre la frecuencia y magnitud de los fenómenos meteorológicos extremos (WWAP, 2019). Por tanto, el ciclo del agua a nivel global se ve alterado en calidad y cantidad de agua disponible, produciendo cambios en la temporalidad e intensidad de las lluvias, así como en la frecuencia y severidad de eventos extremos tales como sequías y ciclones tropicales (Barrios-Ordóñez et al., 2015). En este escenario, es posible que para el año 2025, dos tercios de la población mundial padezca escasez de agua (GWP, 2016). Por lo tanto, se requiere mejorar la SH a través de una buena infraestructura y una buena gobernanza (van Ginkel et al., 2018). En este sentido, son necesarios cambios intersectoriales, así como políticas integradoras que permitan sinergias entre sectores que gestionan el riesgo de desastre, asegurando la demanda y preservando los ecosistemas (UN Water, 2013).

En América Latina y el Caribe no existe un índice de SH, pero se reconoce que debería comprender una visión amplia del agua, su interacción con la sociedad, limitaciones de gestión, infraestructura, riesgos e incertidumbre (Peña, 2016). En esta región, los conflictos por el aprovechamiento, manejo y protección de los recursos hídricos, se han incrementado en los últimos años, alcanzando niveles complejos, impactando la economía, la estabilidad social, la población y el ambiente (Martín & Justo, 2015). En el mismo sentido, en México no existe un índice real de SH (CONAGUA-CONACYT, 2018), llevando a una situación de políticas públicas con poca claridad, ausencia de un marco jurídico adecuado y un sistema de participación social débil en torno a la gobernanza y la SH (Martínez-Austria et al., 2019). Esto a pesar de los múltiples retos que enfrenta el país en el manejo de sus recursos hídricos, ya que México tiene un serio problema con respecto al agua, ubicándose en el grupo de naciones con estrés hídrico alto posicionado en el lugar 24 de 156 países evaluados. Con respecto a sus entidades federativas, 15 de ellas (47%) tiene un estrés hídrico extremadamente alto (Hofste et al., 2019) y en 2018, se calculó que México contaba con un promedio de 3,620 m³/habitante/año; y para el 2030 se espera que exista una disminución del 9.4%, es decir un estimado de 3,283 m³/habitante/año (CONAGUA, 2018a). Adicionalmente al problema de escasez, se encuentra el de calidad del agua, ya que desde el 2006, estudios indican que solo el 66% del agua en México registra valores aceptables para el consumo (Jiménez et al., 2004).

No obstante, en México, Martínez-Austria (2013) y Ávila (2008) han trabajado para definir el concepto de SH. Sus trabajos reportaron que aún se requiere operacionalizar su definición a través de algún índice o instrumento de medición para poder aplicar el concepto (Beck y Villarroel, 2013). Por lo que se prefiere una herramienta conceptual que pueda medirse, en lugar de una definición meramente conceptual, ya que ésta suele enfocarse solo en el ser humano (Gain et al., 2016) o bien, abarca demasiado hasta el punto de no poder implementarse (Zeitoun, 2011). Al respecto, Olivares et al., (2019) realizaron una investigación pionera en el centro occidente de México valorando la SH en dos cuencas hidrológicas, concluyendo que se requieren tres características básicas para medirla: 1) Una definición del concepto como punto de partida 2) la definición de una unidad espacial para medir y 3) variables e instrumentos de medición.

De esta forma, la comprensión del concepto de cuenca hidrológica ha demostrado tener un enorme potencial que nos permite reflexionar, entender y organizar la relación entre la sociedad y el medio ambiente en un espacio geográfico determinado (Burgos

et al., 2015). Por lo anterior, es posible evaluar la seguridad hídrica de acuerdo con las características de un territorio delimitado por cuencas hidrológicas, a partir del desarrollo de indicadores que logren integrar las variables implicadas en el concepto de SH (Martínez-Austria et al., 2017).

Por tanto, el objetivo de nuestra investigación fue construir un índice de SH, aplicarlo a un caso de estudio conectado al concepto replicable de cuenca hidrológica, y evaluar sus resultados utilizando un sistema de información geográfica progresivo que permitió el análisis a través del tiempo y de escalas, que sirva a los tomadores de decisiones, geo-hidrologos y asociaciones civiles, que requieran de un instrumento para medir, planear y gestionar de manera integral la SH en su territorio.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El área de estudio fue el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (Veracruz), México por su importancia hidrológica al ubicarse en la vertiente del Golfo de México, constituida por 46 ríos importantes, destacando el Usumacinta, Grijalva, Papaloapan, Coatzacoalcos y Pánuco, que se ubican en parte del territorio Veracruzano (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2020).

El estado de Veracruz se caracteriza por sus abundantes recursos hídricos, con una precipitación media anual del doble de la media nacional y un tercio del escurrimiento total del país (Torres-Beristáin et al., 2013). No obstante, es el quinto lugar nacional de pérdida de cobertura arbórea con 425 mil ha en el periodo 2001-2019 (Global Forest Watch, 2020b). Además, su ubicación geográfica en la franja central de las costas del Golfo de México, lo han expuesto a los efectos de un gran número de fenómenos naturales como ciclones y lluvias intensas (Acevedo y Llanos, 2015), contabilizando 117 declaratorias de desastre por fenómenos hidro meteorológicos, el mayor número en México en el periodo 2000-2020 (CENAPRED, 2020).

Los límites de estado de Veracruz se obtuvieron de la cartografía digital derivada del Marco Geoestadístico del INEGI (2019), ya que las decisiones de políticas públicas estatales se toman con base en este límite político administrativo. La cartografía digital de las cuencas hidrológicas (Figura 1) se obtuvo del Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2020b).

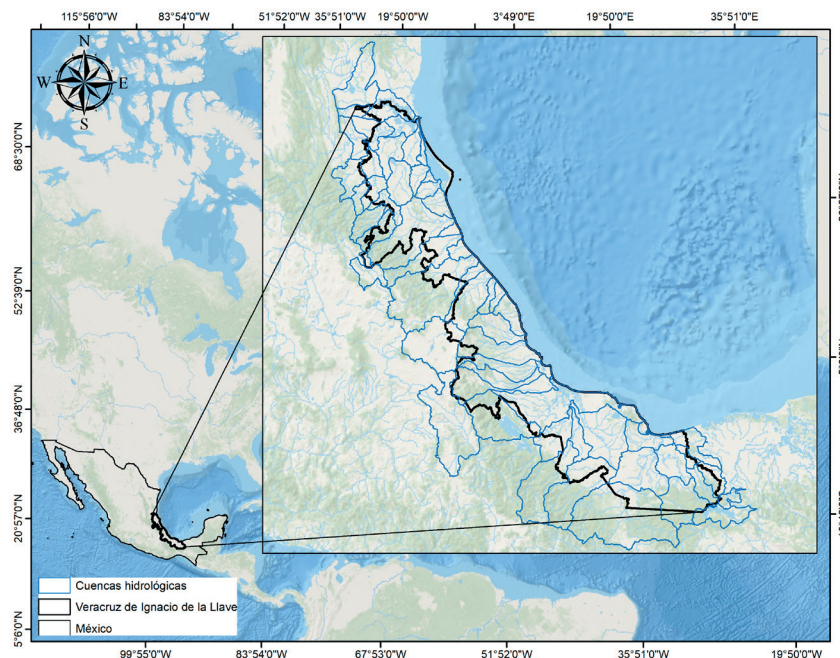


Figura 1 | Veracruz y sus cuencas hidrológicas de estudio (INEGI,2019 y CONAGUA,2020).

METODOLOGÍA

A través del sistema de información geográfica (SIG) ArcGis 10.8 (ESRI, 2019), se procedió a identificar y seleccionar las cuencas hidrológicas concernientes el área de estudio, contabilizando 58 cuencas. La elección de las variables, su incorporación a los indicadores y las dimensiones se basaron en la metodología propuesta por van Beek y Arriens (2014), quienes mostraron que un índice, sus indicadores y variables deben ser de acceso público, fácil de comprender para la sociedad y los tomadores de decisiones, además de utilizar datos actualizados con una secuencia temporal y pertinentes por la escala involucrada, para este caso la cuenca hidrológica. Por lo que después de analizar artículos científicos relevantes (Anexo 1), se identificaron 20 variables y 13 indicadores con las características mencionadas, agrupándolas en las dimensiones A). Socio económica, B). - Medio ambiente, C). - Fenómenos hidro meteorológicos y D). - Escenario de cambio climático.

Posteriormente, con la herramienta de gestión de datos del SIG, todas las variables fueron modeladas o en su caso remuestreadas a 15 m por píxel, a través del método de interpolación bilineal. Lo anterior, con el objetivo de estandarizar la escala sin obtener valores fuera de los rangos de la versión original de la información. Para categorizar los valores de las variables se utilizó el algoritmo de Rupturas Naturales de Jenks dada su buena adaptabilidad y alta precisión en la división de unidades de entorno geográfico (Chen et al., 2013). En este algoritmo, se utilizaron cinco clases, donde la determinación de los cortes de clase se caracterizó por agrupar mejor a los valores similares y maximizar sus diferencias. Los límites de cada clase quedaron establecidos donde existieron diferencias considerables entre los valores de los datos (De Smith et al., 2018). A continuación, se calculó la media aritmética de las variables, obteniendo un valor escala (algoritmo de Jenks) entre el número uno y el cinco, que describió la categoría de SH (Tabla 1), agregándose este valor a las Dimensiones. Posteriormente, se estandarizaron los valores de las dimensiones a través de la función logarítmica con el objetivo de unificar los distintos periodos de la información, el exceso o falta de datos de las variables e indicadores y se calculó la media aritmética de las dimensiones por cuenca hidrológica. Los niveles de evaluación de la SH mantuvieron su relación espacial con las cuencas hidrológicas, con el fin de describir la SH, a través de la dimensión, los indicadores y sus variables, respectivamente. Al final, se clasificó el índice de SH en cuatro rangos excluyendo la SH Muy alta, ya que ninguna cuenca alcanzó el valor máximo en alguna dimensión. De esta forma, se logró una métrica compuesta incorporando variables, indicadores y dimensiones pertinentes para medir la SH y relevantes para el territorio.

Tabla 1 | Rangos, valores y leyendas del índice de seguridad hídrica (Adaptado de van Beek y Arriens, 2014).

Categorización en la variable	Rango de la media aritmética en la dimensión	Semáforo descriptivo de Seguridad hídrica
5	5	Muy Alta
4	4 - 4.9	Alta
3	3 - 3.9	Media
2	2 - 2.9	Baja
1	1 - 1.9	Muy baja

Dimensiones, indicadores y variables

A). *Dimensión socio económica*: Incluye los indicadores de cantidad, calidad, acceso e infraestructura. Las variables utilizadas, fuentes y sus unidades de normalización o escala utilizada se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 | Indicadores, Variables y las unidades utilizadas en la dimensión socio económica.

Indicador	Variable (s)	Fuente	Normalización o clasificación utilizada
Cantidad	Disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas 2014-2020.	CONAGUA, 2020b.	Volumen en hectómetros cúbicos (hm ³) de agua disponible 2020, normalizado por el volumen (hm ³) de agua disponible 2014 por cuenca.
	Satisfacción hídrica potencial anual 2020.	Adaptado de Howard et al., 2020.	Litros diarios por habitante por 365 días (l/d/hab) por cuenca clasificados como: >100 l/d/hab - SH Muy alta, 75.1-100 l/d/hab - SH Alta, 50.1-75 l/d/hab - SH Media, 25.1-50 l/d/hab - SH Baja y <25 l/d/hab - SH Muy baja.

(Tabla 2, continúa en la página siguiente)

(Tabla 2, continúa de la página anterior)

Indicador	Variable (s)	Fuente	Normalización o clasificación utilizada
Calidad	Indicadores de la calidad del agua superficial 2012-2019.	CONAGUA, 2020b.	Valor acumulado del 0-3 por cuenca con base en el semáforo de la calidad del agua, normalizado por el número de muestreos realizados en el periodo por cuenca.
	Ubicación de sitios de disposición final (SDF) de residuos sólidos urbanos.	De la Rosa et al., 2020	Valor acumulado del 0-3 por cuenca con base al cumplimiento de la NOM-083 (SEMARNAT, 2003) del numeral 6, subnumeral 6.1.4 (humedales), 6.1.5, 6.1.6 y 6.1.7, normalizado por el número de SDF existentes por cuenca.
Acceso	Viviendas habitadas sin disponibilidad de agua entubada.	CONAPO, 2012.	Número de viviendas sin agua entubada, normalizadas por el número de viviendas habitadas por cuenca.
Infraestructura	Plantas de tratamiento de agua residual.	CONAGUA, 2020b.	Capacidad instalada para el tratamiento de aguas residuales, normalizada por el caudal tratado de agua por cuenca.
	Obras de protección contra inundaciones 2019 y declaratorias por inundación 2000-2019.	CONAGUA, 2020b.	Número de obras de protección contra inundaciones, normalizadas por el número de declaratorias por inundación en el periodo señalado por cuenca.
	Conectividad.	Red Nacional de Caminos de Carrillo Martínez et al., 2019.	longitud por el ancho de las vías (km/m), normalizados por la superficie de la cuenca hidrológica.

B) *Dimensión medio ambiente*: Incluye los indicadores de protección forestal, calidad de la superficie forestal, protección forestal de zonas riparias e instrumentos de planeación. Las variables utilizadas, fuentes y sus unidades de normalización o escala utilizada se indican en la Tabla 3.

Tabla 3 | indicadores, Variables y las unidades utilizadas en la dimensión medio ambiente.

Indicador	Variable (s)	Fuente	Normalización o clasificación utilizada
Protección forestal	Vegetación forestal 2018.	CONABIO, 2020.	Superficie de vegetación forestal en hectáreas (ha), normalizada por la superficie (ha) total de la cuenca.
	Pérdida de la cubierta forestal 2001-2019.	Hansen et al., 2013.	Superficie (ha) de vegetación forestal perdida del 2001 al 2019, normalizada por la superficie forestal de las cuencas al año 2000 como línea base.
Calidad de la superficie forestal	Estrato arbóreo 2019.	Potapov et al., 2020.	Con base en la “Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación” de INEGI (2017), se clasificó en: Herbáceo (<2 m), arbustivo (<4 m), bajo (4-4 m), mediano (15-30 m) y alto (>30 m).
	Cobertura arbórea 2015.	Townshend, 2016.	Con base en la “Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación” de INEGI (2017), se clasificó en: Sin cobertura (<10%), abierta (10%- 0%) y cerrada (>40%).
Protección forestal de zonas riparias	Vegetación forestal 2018 en zonas riparias.	Ribera o zona riparia 10 m de ancho al cauce de los cuerpos de agua superficial, Ley de Aguas Nacionales, 1992. Vegetación forestal 2018 de CONABIO, 2020.	La superficie de vegetación forestal 2018 en zonas riparia, normalizada por la superficie total de la zona riparia la cuenca.
	Pérdida de la cubierta forestal 2001-2019 en zonas riparias.	Ribera o zona riparia 10 m de ancho al cauce de los cuerpos de agua superficial de la Ley de Aguas Nacionales 1992. Pérdida de la cubierta forestal 2001-2019 Hansen et al., 2013.	Superficie de vegetación forestal perdida del 2001 al 2019, normalizada por la superficie forestal de las zonas riparias en las cuencas al año 2000 como línea base.
Instrumentos de planeación	Tipos de ordenamientos de aguas superficiales 2019.	CONAGUA, 2020b.	Clasificado por tipo de ordenamiento por cuenca como: Reservas de uso público urbano y de medio ambiente valor 5 SH Muy alta, con reserva de medio ambiente valor 4 SH alta, con reserva de uso público urbano valor 3 SH Media, en veda valor 2 SH Baja y sin ningún ordenamiento valor 1 SH Muy baja.

C) *Dimensión riesgos hidro meteorológicos*: Incluye los indicadores de ciclones, inundaciones y sequía por ser los fenómenos más relevantes relacionados con el agua en México. Las variables utilizadas, fuentes y sus unidades de normalización o clasificación utilizada se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 | indicadores, Variables y las unidades utilizadas en la dimensión riesgos hidro meteorológicos.

Indicador	Variable (s)	Fuente	Normalización o clasificación utilizada
Ciclones	Densidad geográfica de la trayectoria de los ciclones 1851-2019.	Knapp et al., 2018.	Se calculó la densidad geográfica en un radio de 50 km lineales al área de estudio; ya que, según los registros hemerográficos, esta es la distancia máxima de daños por ciclón. Se normalizó a través de la longitud (km) de la trayectoria de ciclones, por km ² de las cuencas.
Inundaciones	Riesgo de inundación con periodo de retorno de 5 años.	CONAGUA, 2013.	Superficie (ha) inundable, normalizada por la superficie (ha) de la cuenca.
Sequía	Frecuencia de intensidad de sequía 2003-20019.	National Integrated Drought Information System, 2020.	Se clasificó con base en la intensidad de sequía de CONAGUA (2020a): Anormalmente seco (D0), Sequía moderada (D1), Sequía severa (D2), Sequía extrema (D3) y Sequía excepcional (D4). Posteriormente se calculó la frecuencia para cada una de las clasificaciones.

D) *Dimensión escenario de cambio climático*: Incluye los indicadores derivados del modelo de proyección HadGEM2-es del Met Office Hadley Centre al año 2030, en un escenario no modificado (BAU), basado en el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Las variables utilizadas, fuentes y sus unidades de normalización o clasificación utilizada se indican en la Tabla 5.

Tabla 5 | indicadores, Variables y las unidades utilizadas en la dimensión escenario de cambio climático.

Indicador	Variable (s)	Fuente	Normalización o clasificación utilizada
Inundaciones	Riesgo de inundación con periodo de retorno de 5 años.	Ward et al., 2020.	Superficie (ha) con riesgo de inundación, normalizada por la profundidad de inundación (m).
Estrés hídrico (EH)	Demanda de agua con relación al agua disponible.	Hofste et al., 2019	Se definió la SH por cuenca adaptando los valores de la clasificación propuesta por Hofste et al., (2019) donde: EH bajo (<10%) - SH Alta, EH Bajo medio (10% - 20%) - SH Media, EH Medio alto (20% - 40%) - SH Baja y EH Alto (40% - 80%) - SH Muy baja.

RESULTADOS

El análisis del Índice de SH mostró que en la región de estudio 21 cuencas hidrológicas (36%) registraron una SH Media, mientras que 20 una SH Baja (34%). Sólo 6 cuencas (10%) registraron una SH Muy Baja y ninguna alcanzó la categoría de SH Muy alta. Los resultados indican que las cuencas hidrológicas con SH Alta se encuentran distribuidas a lo largo del territorio, mientras que los valores de SH Baja y Muy baja, se concentran principalmente en el norte y sur (Figura 2). Los resultados más bajos del Índice de SH se registraron en los valores de la dimensión de escenario de cambio climático y los más altos en la dimensión socio económica.

El indicador con mayor puntuación fue Inundaciones con 3.6 puntos, ubicándose en SH Media y el más bajo Infraestructura con 2.4 puntos ubicándose en SH Baja. La variable con menor puntuación fue Obras de protección contra inundaciones con un valor de 1.7 puntos, ubicándose en SH Muy Baja; y la variable que tuvo el mayor puntaje fue Satisfacción hídrica potencial con 4.2 puntos, ubicándose en SH Alta (Figura 3).

El resultado en las Dimensiones indicó que Riesgos hidrometeorológicos tiene una SH baja con el menor valor de 2.89 puntos, mientras que el valor más alto fue el de la Dimensión de Escenario de cambio climático con un valor de 3.21 puntos ubicándose como SH Media, como se aprecia en la Figura 4.

A) *Dimensión socio económica*: El análisis realizado mostró que 30 cuencas hidrológicas (52%) tienen una SH Media y 26 (45%) tienen una SH Baja. Los resultados más bajos de esta dimensión se encontraron en el indicador de infraestructura, al obtener un valor de 2.4 puntos de un máximo de 5, ubicándose como SH Baja. El valor más alto fue el indicador de calidad con 3.5 puntos ubicándose como SH Media. En las variables de los indicadores destacaron con el valor más bajo de 1.7 puntos, las obras de protección contra inundaciones con SH Muy baja. El valor más alto lo tuvo la variable de satisfacción hídrica potencial

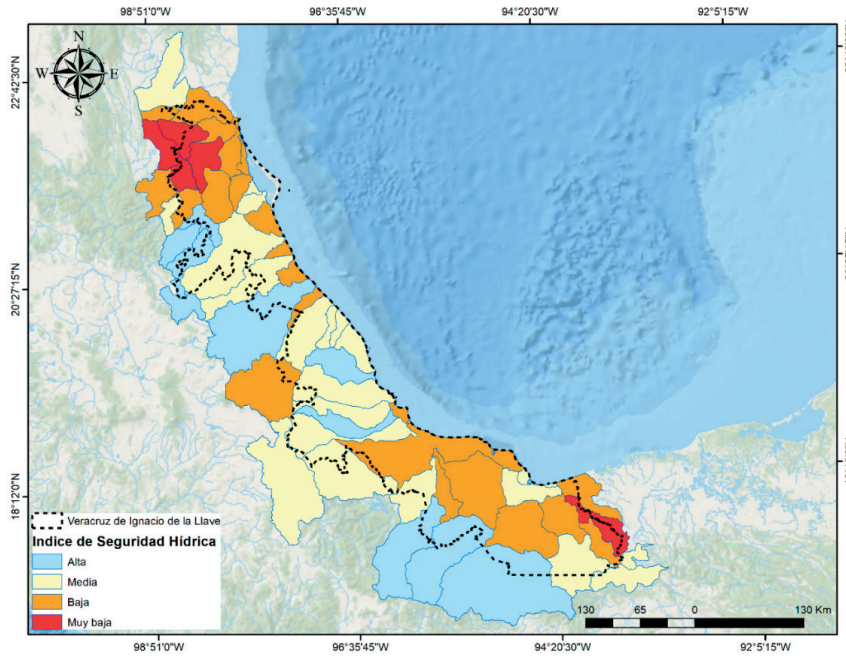


Figura 2 | Resultados del Índice de Seguridad hídrica y su distribución en el área de estudio.

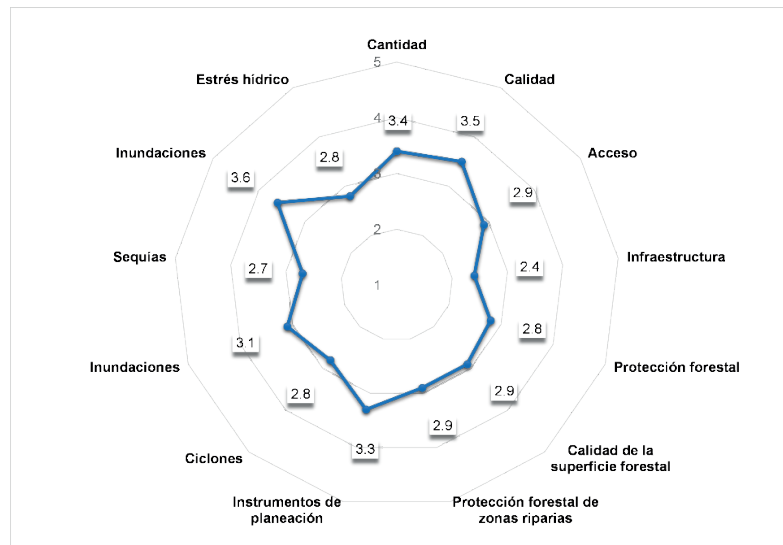


Figura 3 | Resultados de los indicadores del Índice de Seguridad Hídrica para el estado de Veracruz.

con un valor de 4.2 puntos en la categoría de SH Alta. La variable de disponibilidad de agua destacó, ya que el 77% de las cuencas hidrológicas presentaron una disminución de agua, con valores de -1% a -89% de volumen (hm^3) en el periodo de 2014 al 2020.

B) *Dimensión medio ambiente*: Fue significativo que 25 cuencas hidrológicas (48%) tienen una SH Baja y 16 (27%) tienen una SH Media. Los resultados más bajos de esta dimensión se encontraron en el indicador de protección forestal, al obtener un valor de 2.8 puntos de un máximo de 5, ubicándose como SH Baja, y el valor más alto fue el indicador de calidad con un valor de 3.3 puntos ubicándose como SH Media. En las variables de los indicadores destacó con el valor más bajo de 2.5 puntos, la variable de vegetación forestal, ubicándose en la categoría de SH Muy baja, el valor más alto lo tiene la variable de tipo de ordenamiento

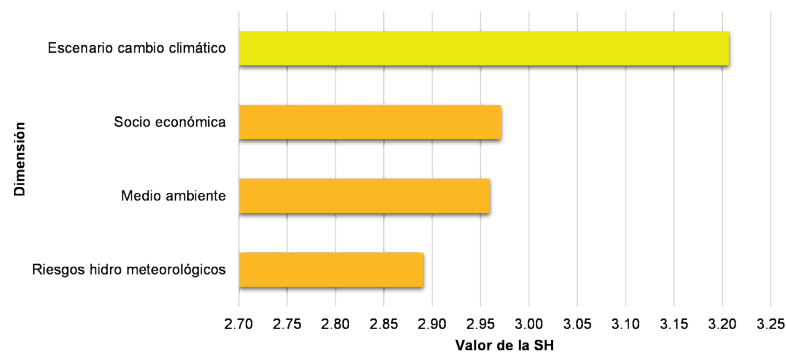


Figura 4 | Resultados de las Dimensiones del Índice de Seguridad Hídrica para el estado de Veracruz.

de agua superficial, con un valor de 3.3 puntos en la categoría de SH Media. La variable de vegetación forestal destacó por el valor alcanzado, ya que el 29% de las cuencas hidrológicas (17) presentan una SH Muy baja con porcentajes de vegetación forestal de 1% a 8% en estas cuencas.

C) *Dimensión riesgos hidro meteorológicos*: Resultó relevante que 26 cuencas hidrológicas (45%) tuvieran una SH Baja. Los resultados más bajos de esta dimensión se encontraron en el indicador y variable de sequía, al obtener un valor de 2.7 puntos de un máximo de 5, ubicándose como SH Baja, mientras que el valor más alto resultó el indicador y variable de inundaciones, con un valor de 3.1 puntos ubicándose como SH Media. La variable de frecuencia de intensidad de sequía destacó por ser el fenómeno más extendido en 25 cuencas hidrológicas con valores de SH Muy baja y baja.

D) *Dimensión escenario de cambio climático*: El análisis realizado indicó que 27 cuencas hidrológicas (46%) tuvieron una SH Media, mientras que 17 tienen una SH Baja (29%); ninguna cuenca hidrológica alcanzó la categoría de SH Muy alta. Los resultados más bajos de esta dimensión se encontraron en el indicador y variable de estrés hídrico, al obtener un valor de 2.7 puntos de un máximo de 5, ubicándose como SH Baja. Lo que indicó que 28 cuencas (48%) pueden padecer estrés hídrico en el rango de 20%-40% y de 40%-80%, ubicándose en las categorías de SH Baja y Muy baja, respectivamente.

DISCUSIÓN

Se coincide en la afirmación de Burgos et al., 2015 y Kauffer y Gallardo, 2019, mencionando que la cuenca demostró ser un elemento de interacción natural para analizar y medir la SH; además, estos últimos autores optaron por un sistema de información progresivo que permitió el análisis multiescalar, como el realizado en esta investigación. No obstante, se difiere de la propuesta realizada por Rodríguez et al., (2017) con respecto al Índice de SH, ya que se basaron principalmente en la calidad y cantidad del agua, proponiendo la escala de Municipio y Estado, además de excluir la variable forestal y escenario de cambio climático. En el mismo sentido, Cervantes-Jiménez et al., (2020) realizaron una propuesta de índice de manejo sustentable del agua, sin incorporar variables forestales o de escenario de cambio climático. Zeitoun (2011) indicó que la mayoría de los autores en definiciones e índices mundiales de SH no tomaron en cuenta variables relacionadas con el medio ambiente; lo cual, ha sido parte de la problemática para definir y mejorar la SH. Por tanto, se coincidió con Olivares et al., (2019) en la posibilidad de medir la SH con enfoque de cuenca y se reconoce que estos autores proponen dos variables innovadoras como la satisfacción hídrica potencial y la conectividad entre los habitantes de la cuenca; por lo que fueron implementadas en esta investigación. Cabe señalar que no se analizaron todas las variables o indicadores referentes al tema, por lo que el análisis puede mejorarse; sin embargo, la información utilizada coincide con lo que indica van Beek y Arriens (2014) destacando que, la forma de medición simple puede facilitar la comprensión para la sociedad y los tomadores de decisiones.

En la Dimensión socio económica, la variable de obras de protección contra inundaciones obtuvo el valor más bajo; lo cual, se puede explicar desde dos factores, el primero es la calidad de las obras, ya que el método tradicional, según Maldonado et al., (2018), consistió en definir un riesgo aceptable con base en la venida máxima y su periodo de retorno sin tomar en cuenta la magnitud

de los daños que podrían causar las avenidas e inundaciones. El segundo factor fue la cantidad de las obras o su falta de planeación, ya que de 2017 al 2019 según el Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2019); se reportó el mismo número de obras de este tipo. Los resultados obtenidos indicaron que las inundaciones en México son un reto de SH, coincidiendo con Martínez-Austria (2013). Aunque la satisfacción hídrica potencial obtuvo la puntuación más alta, con sólo el 12% de las cuencas del área de estudio categorizadas con una SH hídrica muy baja, esto significa que más de 4 millones (33%) de los habitantes en el área de estudio, no tuvieron cubiertas sus necesidades básicas del vital líquido de manera constante durante todo el año; este resultado, coincide con uno de los mayores retos que enfrentará México de manera más aguda en las próximas décadas según la OCDE (2018). Sin embargo, las estadísticas oficiales del agua en México (CONAGUA, 2018b) se centraron en la clasificación puntual de la existencia de agua (con o sin disponibilidad) por cuenca, lo que sugiere porcentajes mayores al 91% de “disponibilidad de agua”. No obstante, Toledo (2002), Becerra Pérez et al., (2006) y Reig et al., (2013) destacaron que uno de los mayores problemas y fuente de conflicto en México es la disminución del agua disponible, coincidiendo con los resultados obtenidos, donde más del 77% de las cuencas hidrológicas presentaron una disminución de volumen significativo, al llegar hasta el -89% de volumen en una cuenca en tan solo seis años. Una debilidad en el análisis de esta variable fue la falta de resultados publicados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020 durante la investigación; sin embargo, ante una proyección de la población de 124.9 millones de personas en México según INEGI (2018), el escenario indicó que habrá más demanda y menos agua.

Con respecto a la calidad del agua que obtuvo un valor de 3.1 puntos, categorizándose por dos décimas como SH Media, Ibararán et al., (2017) mencionó que, en 2006 el 74% del agua superficial en México tenía algún grado de contaminación, coincidiendo con los resultados obtenidos. Además, cuando se contrastaron las cifras de indicadores y sitios de muestreo con el estándar internacional, se encontró que México está por debajo de la media, como indica Martínez-Austria, (2013). El otro punto relevante acorde Martínez-Austria et al., (2019) radicó en que estos indicadores no tomaron en cuenta la existencia de contaminantes que, en cantidades pequeñas son nocivos para la salud y el medio ambiente; en este sentido, Máynez-Navarro et al., (2018) señaló que, en México las cantidades máximas permisibles con respecto de la contaminación fueron elevadas, en contraste con otros países, como Estados Unidos o la Unión Europea. En lo que respecta al indicador de cantidad de agua, en México existe un problema en el tema de la disponibilidad como lo señaló Jiménez-Cisneros et al., (2010) y recientemente Máynez Navarro et al., (2018).

La Dimensión de medio ambiente es poco explorada en la SH, su inclusión en esta investigación coincide con Shah (2016), sobre el enfoque integral y multisectorial que debe darse en la gestión de los recursos hídricos, incluyendo al medio ambiente. Además, la UNESCO (2020) indicó que el agua es un eje rector multifactorial, que incluye la protección y restablecimiento de los ecosistemas forestales. Al respecto, el indicador de protección forestal obtuvo el valor de SH Bajo, el menor en esta dimensión. Este resultado concuerda con lo registrado por la investigación de la FAO (2020), ya que ubica a México en tercer lugar mundial de pérdida forestal en el periodo 1990-2000 y según Global Forest Watch (2020a), del periodo 2001-2019 México se ubicó en el 15 lugar de pérdida forestal, destacando el estado de Veracruz en quinto lugar nacional en el mismo periodo. Mientras que Aguilar et al., (2000) ubicó a Veracruz en primer lugar de deforestación en el periodo 1973-1993; lo anterior coincidió con los bajos resultados obtenidos de los porcentajes de vegetación de 1.3% a 16.6% en el 55% de las cuencas analizadas. En lo que respecta a las variables de pérdida forestal y pérdida forestal en zonas riparias, estas obtienen una categoría de SH Media, lo cual se explica en dos temáticas: 1.- Kaimowitz (2008) menciona que la pérdida forestal en mayor magnitud se dio en Mesoamérica y México en el periodo 1970-1990; en la actualidad, según Rosete-Vergés et al., (2014) el ritmo de pérdida forestal ha disminuido, principalmente debido a la segunda temática, 2.- Kaimowitz (2008) y López (2012) coincidieron en que la mayor parte de la vegetación que aún se conserva, se encuentra en lugares no accesibles o con poca aptitud para otro tipo de actividades productivas; entre otros factores. En este sentido, los resultados obtenidos con respecto de la disminución de recursos forestales fueron coherentes con otras investigaciones, sin dejar de ser alarmantes debido a la extracción constante de los recursos forestales.

En la Dimensión de fenómenos hidrometeorológicos es de destacar la sequía, ya que acumuló menos declaratorias que los ciclones o inundaciones en Veracruz según la base de datos del CENAPRED (2020); sin embargo, obtuvo la menor puntuación en esta dimensión debido a que el 43% de las cuencas analizadas presentaron una frecuencia de intensidad de sequía tal, que se categorizaron como SH Muy Baja (4 cuencas) y SH Baja (21 cuencas). Estos resultados coincidieron con lo afirmado por Valdés-Rodríguez et al., (2020) ya que la sequía es un estado relativo y no absoluto que requiere un lapso de tiempo para detectarse, pero que se ha incrementado en el 66% del territorio veracruzano a lo largo de este siglo, impactando una mayor extensión geográfica.

Por lo tanto algunos autores como Damania et al., (2019) afirmaron que los efectos a largo plazo de las sequías severas en las localidades son más costosos que las inundaciones. Los resultados obtenidos para la zona de estudio se confirman, ya que Cerda et al., (2007) reportó en México registros de sequías desde la época prehispánica y en especial una en 1998 que se generalizó en todo el país como un caso excepcional del siglo XX. Coincidiendo con los resultados obtenidos en Veracruz, García-Jiménez et al., (2002) obtuvo registros de sequías severas con daños sociales y económicos desde 1977. Guerra-Martínez et al., (2020) reportó 9 municipios en Veracruz con la más alta frecuencia de sequía del periodo 2007-2018; los cuales, se encuentran en las cuencas hidrológicas clasificadas con SH Muy baja y SH Baja por su frecuencia de intensidad de sequía.

En la dimensión de escenario de cambio climático, recientemente la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2020) ha señalado que el calentamiento global ha llevado en 2019 al calentamiento de la tierra a +1.1 °C, lo que tiene diversos impactos en la precipitación y disponibilidad de agua, además de todos los sistemas naturales interconectados. Las proyecciones de la OMM (2020b) para el periodo 2021-2025 indicaron la probabilidad que la temperatura mundial anual supere al menos en +1 °C los niveles preindustriales en cada uno de los próximos cinco años, aún con el confinamiento generado por la pandemia del COVID-19. En este sentido, el IPCC (2018) advirtió del incremento en los riesgos con un calentamiento global de +1.5 °C, por lo que se prevé que el estrés hídrico aumente. Sin embargo, el mismo IPCC (2019) ha definido que las presiones adicionales del desarrollo socioeconómico podrían exacerbar aún más los problemas, y que las investigaciones realizadas dan como resultado un incremento en la demanda de agua y escasez de esta en cualquier escenario. Estas afirmaciones coincidieron con los resultados obtenidos en la variable de estrés hídrico y disponibilidad de agua, donde se observó que el 43% de las cuencas hidrológicas analizadas, se catalogaron con una SH Baja a Muy Baja por presentar un escenario de estrés hídrico del 20% al 40% y del 40% al 80%, respectivamente. En el ámbito estatal, los resultados mostraron coherencia con lo que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2019) publicó, ya que en Veracruz el 61% de la población vive en las ciudades y en 2030 se prevé un incremento de la población, lo que puede acrecentar el estrés hídrico. Al respecto, Martínez et al., (2020) señaló que el impacto del cambio climático específicamente en la hidrología de Veracruz será a través de una disminución de agua disponible, entre otros efectos.

CONCLUSIONES

El índice de SH planteado logró incluir y analizar de manera efectiva el estado de Veracruz bajo el concepto de cuenca hidrológica con variables e indicadores relevantes en el territorio. Además, este índice puede replicarse en otras regiones. Asimismo, existen muchos retos por incursionar y resolver, pero es posible avanzar en ellos empezando por la planeación de las obras contra inundaciones, donde deben replantearse las obras para cuencas con el fin de que tengan un mejor impacto en la contención de este fenómeno. Por tanto, pocas obras de este tipo bien ubicadas darán un mejor resultado en comparación con muchas obras, donde no se requieren.

Se requiere especial atención de la proveeduría de agua en cantidad y calidad para lograr una satisfacción hídrica potencial, para ello, debe medirse la calidad del agua en todas las cuencas ya que todas están habitadas. En consecuencia, el número de indicadores y sitios de muestreo de la calidad del agua en México debe ser incrementado; con el fin de detectar todos los posibles contaminantes que pudiesen atentar a la salud de los habitantes. Los datos de disponibilidad de agua deberán resaltar la disminución en el volumen disponible; de no hacerlo puede retrasarse la implementación de estrategias para mantener o mejorar la cantidad de agua. El estado de los recursos forestales fue sin duda relevante, ya que está interrelacionado con la SH en muchos ejes denotado por los resultados mostrados. Esto no quiere decir que se deba abordar la seguridad hídrica sólo desde una variable, pero sí que esta debe estar presente en cualquier aproximación de este tema; ya que, aunque la pérdida forestal no esté en aumento, el impacto es muy negativo para el ecosistema y exacerbará los efectos del cambio climático.

De los tres fenómenos hidrometeorológicos analizados, la sequía mereció especial atención para la prevención del riesgo de desastre ya que es el fenómeno con mayor impacto geográfico en diversas intensidades. Lo que puede derivar en menor volumen de agua y otros efectos negativos subyacentes. Por estas razones, es importante empezar a utilizar la frecuencia de intensidad de sequía en la planeación de obras para mitigar sus efectos en el marco de la cuenca hidrológica; donde es posible identificar las áreas específicas que presentan este fenómeno con mayor frecuencia e intensidad.

Los efectos del cambio climático repercuten en todas las variables e indicadores analizados. Los gobiernos en todos los niveles deben empezar a actuar de manera eficiente preparándose ante el escenario evidente de escasez de agua y la ciudadanía debe empezar a replantearse la forma de vida actual, empezando a poner en práctica nuevas medidas de adaptación y mitigación ante el escenario de estrés hídrico. El Índice de SH planteado, puede colaborar para la toma de decisiones proactivas en vez de reactivas, contribuyendo a que los recursos naturales, estén disponibles para las próximas generaciones.

Un estudio que complementaría el índice planteado sería el análisis de la información de aguas subterráneas, así como el crecimiento urbano en cada cuenca hidrológica, a efecto de prever escenarios futuros por la demanda del recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca N° 635886 otorgada al candidato a Doctor en Desarrollo Regional Sustentable, Mtro. Andrés de la Rosa Portilla; por la cual, fue posible esta investigación. Y a los revisores anónimos por sus sustanciales aportaciones y correcciones en la mejora del artículo.

REFERENCIAS

- Acevedo, F., Llanos, J. 2015. Consideraciones hidrometeorológicas relacionadas con el deslizamiento de laderas en el estado de Veracruz. En L. Jiménez (Ed.), *Inestabilidad de laderas en el Estado de Veracruz: necesidades de investigación y búsqueda de soluciones* (Instituto, p. 139). Instituto de Ecología A.C.
- Aguilar, C., Martínez, E., Arriaga, L. 2000. Deforestación y fragmentación de ecosistemas: ¿Qué tan grave es el problema en México. *Biodiversitas*, 30(1), 7–11.
- Ávila, P. 2008. Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México Ciencias. *Ciencias*, 90, 46–57.
- Barrios-Ordóñez, J.E., Salinas-Rodríguez, S.A., Martínez, A., López-Pérez, M., Villón-Bracamonte, R.A., Rosales-Ángeles, F., Beuermann, D., Jackson, C.K., Sierra, R., Nin-Pratt, A. 2015. *Programa Nacional de Reservas de Agua en México: Experiencias de caudal ecológico y la asignación de agua al ambiente*. Inter-American Development Bank.
- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J. 2008. *El cambio climático y el agua*. PNUMA, Ginebra (Suiza) Organización Meteorológica Mundial, Ginebra (Suiza).
- Becerra-Pérez, M., Sáinz-Santamaría, J., Muñoz-Piña, C. 2006. Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y política pública*, 15(1), 111–143.
- Beck, M.B., Villarreal, R. 2013. On water security, sustainability, and the water-food-energy-climate nexus. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 7(5), 626–639. <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0548-6>
- Burgos, A., Bocco, G., Sosa, J. 2015. Dimensiones sociales en el manejo de cuencas. *CIGA-UNAM, DF*, 236.
- Carrillo-Martínez, J.T., Backhoff-Pohls, M.A., Carrasco-Esparza, R.D., González-Moreno, J.O., Hernández-Mauricio, M.R., Meza-Martínez, L.I., Montoya-Ortiz, L.A., Morales-Bautista, E.M., Rangel-Espinosa, M. del R., Rodríguez-Bonilla, J.C., Rodríguez-García, E., Serna-García, M., Vallecillo-Palos, R.I., Vázquez -Paulino, J.C., Velázquez-Navarro, T. 2019. *Red Nacional de Caminos*. IMT-INEGI.
- CENAPRED. 2020. *Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2019*. Atlas Nacional de Riesgos; Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/#>
- Cerda, M.E.H., Anaya, G.C., Sánchez, G.A. 2007. *Mitos y realidades de la sequía en México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Cervantes-Jiménez, M., Díaz-Delgado, C., González-Sosa, E., Gómez-Albores, M.A., Mastachi-Loza, C.A. 2020. Proposal of a water management sustainability index for the 969 sub-basins of Mexico. *Journal of Maps*, 16(2), 432–444. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1763486>
- Chen, J., Yang, S., Li, H., Zhang, B., Lv, J. 2013. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 3, 47–50. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>
- CONABIO. 2020. *Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ program (MAD-Mex)*. Cobertura de Suelo Sentinel 2, 2018. https://monitoreo.conabio.gob.mx/snmb_charts/descarga_datos_madmex.html
- CONAGUA-CONACYT. 2018. *Demanda 3 - Estudio de la seguridad hídrica en México y el mundo*. (Convocatoria 2018-1 CONAGUA - CONACYT).
- CONAGUA. 2013. *Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el atlas nacional de riesgos por inundaciones*.
- CONAGUA. 2018a. *Agua renovable*. Sistema Nacional de Información del Agua. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=aguaRenovable&ver=mapa>
- CONAGUA. 2018b. *Estadísticas del Agua en México 2018*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONAGUA. 2019. *Obras de protección contra inundaciones 2019*. Sistema Nacional de Información del Agua. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/geosinav2.html#&ui-state=dialog>
- CONAGUA. 2020a. *Categorías de sequía*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/categorias-de-sequia>
- CONAGUA. 2020b. *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php>
- CONAPO. 2012. *Índice de marginación por localidad 2010*. Consejo Nacional de Población (CONAPO).
- Damania, R., Desbureaux, S., Rodella, A.S., Russ, J., Zaveri, E. 2019. *Quality unknown: The invisible water crisis*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1459-4>
- De la Rosa, A., Ruelas-Monjardín, L.C., Cortés, J.A. 2020. Aptitud territorial de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos. En Editorial Resistencia S.A. de C.V. (Ed.), *Dialogando lo ambiental, compartiendo experiencias e intercambiando saberes* (Primera ed, p. 348). Secretaria de Medio Ambiente del estado de Veracruz.
- De Smith, M.J., Goodchild, M.F., Longley, P. 2018. *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador publishing ltd.
- ESRI. 2019. *ArcGis* (10.8).
- FAO. 2013. *Forests and water. International momentum and action*. United Nations.
- FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Data Export*. (FAO (ed.)).
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. 2020. *Cuerpos de agua*. <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>
- Gain, A., Giupponi, C., Wada, Y. 2016. Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 11(124015). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- García-Jiménez, F., Fuentes-Mariles, O., Matías-Ramírez, L.G. 2002. *Sequías. Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED). Serie Fascículos*. Secretaría de Gobernación Mexico.
- Global Forest Watch. 2020a. *Global Forest Watch. México*. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MEX/?category=forest-change&dashboardPrompts=eyJzaG93UHJvbXB0cyI6dHJ1ZSwicHJvbXB0c1ZpZXd1ZC16WyJzdWJzY3JpYmVUbn0FyZWWEiLCJ2aWV3TmF0aW9uYW9uYWxEXXNoYm9hcmRzIiwizG93bmXvYWREYXNoYm9hcmRTdGF0cyIsInNoYXJzIjV2IktZ2V0I>

- Global Forest Watch. 2020b. *Pérdida de cobertura arbórea en Veracruz, Mexico*. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MEX/30?category=summary&dashboardPrompts=eyJvcGVuIjpmYWxzZSwic3RlcEluZGV4IjowLCJzdGVwc0tleSI6ImRvd25sb2FkRGFzaGJvYXJkU3RhdHMiLCJmb3JjZSI6dHJlZX0%3D&firesAlerts=eyJpbmRlcmFjdGlvbil6e319&gladAlerts=e yJpbn>
- Grey, D., Sadoff, C.W. 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water policy*, 9(6), 545–571. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>
- Guerra-Martínez, A., López-Galindo, L.K., Álvarez-Ramírez, M.M., Antonio-Sánchez, D.G. 2020. Caracterización de la sequía en el Estado de Veracruz (2007-2018) y su efecto en la Seguridad Alimentaria. *Observatorio de Seguridad Alimentaria y Nutricional de Veracruz*. <https://doi.org/10.25009/uvserva.v0i10.2706>
- GWP. 2016. *GWP in action 2015 annual report*.
- Hansen, M.C., Potapov, P.V, Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V, Goetz, S.J., Loveland, T.R. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change v1.7. *Science*, 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hofste, R.W., Kuzma, S., Walker, S., Sutanudjaja, E.H., Bierkens, M.F.P., Kuijper, M.J.M., Faneca-Sánchez, M., Van Beek, R., Wada, Y. 2019. *Aqueduct 3.0: Updated Decision Relevant Global Water Risk Indicators*. Technical Note. World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/writn.18.00146>
- Howard, G., Bartram, J., Williams, A., Overbo, A., Geere, J.A., Organization, W.H. 2020. *Domestic water quantity, service level and health*. World Health Organization.
- Ibarrarán, M.E., Mendoza, A., Pastrana, C., Manzanilla, E.J. 2017. Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y sociedad*, 29(69), 89–125. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.69.a325>
- INEGI. 2017. *Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y de vegetación: Escala 1: 250 000 (VI)*. INEGI.
- INEGI. 2018. *Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica*.
- INEGI. 2019. *Marco Geoestadístico*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2019. *Cambio climático: estados y municipios*. https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/IG/IG_30.html
- IPCC. 2018. *Global Warming of 1.5 °C*. OMM,PNUMA.
- IPCC. 2019. *Climate Change and Land*. <https://www.ipcc.ch/report/srccl/>
- Jiménez, B., Marín, L., Morán, D., Fuentes, O.A.E., Alcocer, J., Martínez, V.H. 2004. *El agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias México.
- Jiménez-Cisneros, B.E., Torregrosa, M.L., Aboites, L. 2010. *El agua en México: cauces y encauces* (Número 363.610972 A3).
- Kaimowitz, D. 2008. The prospects for reduced emissions from deforestation and degradation (REDD) in Mesoamerica. *International Forestry Review*, 10(3), 485–495.
- Kauffer, E., Gallardo, V. 2019. *Seguridad hídrica (SH) en México: ¿Cómo y para quién?*
- Knapp, K.R., Diamond, H.J., Kossin, J.P., Kruk, M.C., Schreck, C.J.I. 2018. *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4. NA*. National Centers for Environmental (NOAA).
- Ley de Aguas Nacionales, 1992.
- López, A. 2012. Deforestación en México: Un análisis preliminar. *Centro de Investigación y Docencia Económicas, AC México, DF, México*, 527, 46.

- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D., Nobre, A.D., Li, B.L. 2013. Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. *Atmospheric chemistry and Physics*, 13(2), 1039–1056. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1039-2013>
- Maldonado, N.A., Jiménez, F.J.V., Apreza, J.L.D., Cerecero, E.C. 2018. Obras de protección contra inundaciones. *Revista Innova Ingeniería*, 1(3), 8.
- Martín, L., Justo, J.B. 2015. *Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe*.
- Martínez, A.T., del Valle Cárdenas, B., Rodríguez, C.M.W., Martínez, C.A.O. 2020. *Veracruz, una década ante el cambio climático* (Gobierno del Estado de Veracruz (ed.)).
- Martínez-Austria, P.F. 2013. Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 172–173.
- Martínez-Austria, P.F., Díaz-Delgado, C., Moeller, G. 2017. *Seguridad hídrica en México*. Academia de Ingeniería México.
- Martínez-Austria, P.F., Díaz-Delgado, C., Moeller-Chavez, G. 2019. Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del agua*, 23(2), 107–121. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>
- Maynez-Navarro, O.D., Gómez-Gallegos, M.A., Bautista-Guerrero, A. 2018. Diagnóstico del agua en México y seguridad hídrica. *Entorno UDLAP*, 6, 43.
- National Integrated Drought Information System. 2020. *Monitor de Sequía de América del Norte*. Intensidad de la sequía. <https://www.drought.gov/nadm/content/north-american-drought-monitor>
- OCDE. 2018. *Getting it Right: Prioridades estratégicas para México* (OCDE).
- Olivares, O.S., Burgos, A.L., Ramírez, J.S., Bocco, G. 2019. Valoración de la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrográfica: Aplicación en cuencas rurales del Centro Occidente de México. *Journal of Latin American Geography*, 18(2), 88–119. <https://doi.org/10.1353/lag.2019.0035>
- Organización Meteorológica Mundial. 2020a. *Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019*.
- Organización Meteorológica Mundial. 2020b. *Nuevas predicciones climáticas de las temperaturas mundiales de los próximos cinco años*. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/nuevas-predicciones-climáticas-de-las-temperaturas-mundiales-de-los>
- Peña, H. 2016. *Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Potapov, P., Xinyuan, L., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M.C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Edibaldo-Silva, C., Armston, J., Dubayah, R., Blair, B.J., Hofton, M. 2020. Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Zenodo, In review*, 27. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4008406>
- Reig, P., Maddocks, A., Gassert, F. 2013. World's 36 most water-stressed countries. *World Resources Institute*. <https://www.wri.org/insights/worlds-36-most-water-stressed-countries>.
- Requena, C.I. 2017. Cambio Climático, deforestación y agua. 1. *Panorama internacional y regional*, 55.
- Rodríguez, J.M., Tzatchkov, V., Cortez, P., Sainos, A., Llaguno, Ó., Sandoval, L., Ortega, D., Mendoza, E.Y., Navarro, S. 2017. *Índices de seguridad hídrica*. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1831>
- Rosete-Vergés, F.A., Pérez-Damián, J.L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E.N., Salinas-Chávez, E., Remond-Noa, R. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y bosques*, 20(1), 21–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201173>
- SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción y operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos. *Diario Oficial de la Federación*.

- Shah, T. 2016. Increasing water security: the key to implementing sustainable development goals. En *TEC Background Papers* (Número 22, pp. 1–56). Global Water Partnership.
- Toledo, A. 2002. El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, 64, 9–18.
- Torres-Beristáin, B., González-López, G., Rustrián-Portilla, E., Houbron, E. 2013. Enfoque de cuenca para la identificación de fuentes de contaminación y evaluación de la calidad de un río, Veracruz, México. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 29(3), 135–146.
- Townshend, J. 2016. *Global Forest Cover Change (GFCC) Tree Cover Multi-Year Global 30 m V003*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/GFCC/GFCC30TC.003>
- UN Water. 2013. *Water Security and the Global Water Agenda. The UN-Water analytical brief*. United Nations.
- UN Water. 2017. *Integrated Monitoring Guide for Sustainable Development Goal 6 on Water and Sanitation. Targets and global indicators*.
- UNESCO. 2020. *La seguridad hídrica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Manual de capacitación para tomadores de decisión*.
- Valdés-Rodríguez, O.A., Soares, D., Vázquez-Aguirre, J.L. 2020. Encuentros y desencuentros en la evaluación de la sequía en Veracruz. En C.M. Welsh-Rodríguez (Ed.), *Octava Reunión Nacional 2020 de la Red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos*. (p. 50).
- van Beek, E., Arriens, W.L. 2014. Water security: Putting the concept into practice. *TEC Background Papers*, 20, 1–55.
- van Ginkel, K.C.H., Hoekstra, A.Y., Buurman, J., Hogeboom, R.J. 2018. Urban Water Security Dashboard: systems approach to characterizing the water security of cities. *Journal of water resources planning and management*, 144(12), 4018075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000997)
- Wahlstrom, M. 2015. La función decisiva de los árboles y los bosques en la reducción del riesgo de desastres. *Unasyuva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 66(243/244), 1–3.
- Ward, P.J., Winsemius, H.C., Kuzma, S., Bierkens, M.F.P., Bouwman, A., De Moel, H., Loaiza, A.D., Eilander, D., Englhardt, J., Erkens, G. 2020. *Aqueduct Floods Methodology*.
- WWAP. 2019. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. Cifras y datos*.
- Zeitoun, M. 2011. The global web of national water security. *Global Policy*, 2(3), 286–296. <https://doi.org/10.1111/j.1758-5899.2011.00097.x>

ANEXO

Tabla Anexo 1 | Publicaciones científicas analizadas para la construcción del índice de SH.

Autor (es)	Conceptos relevantes
Watkins David W. et al.,2004.	Revisión de métricas y variables para la sostenibilidad en el uso del agua.
Dunn y Bakker,2009.	Construcción de indicadores para medir y evaluar la SH en límites políticos.
Zeitoun,2011.	Análisis del fracaso de las políticas sobre SH y recomendaciones de análisis desde el medio ambiente.
Dunn et al., 2012.	Revisión de los enfoques para medir y evaluar la SH, además de una guía implementando datos de calidad del agua.
Bakker et al., 2013.	Análisis de variables, indicadores, dimensiones y su integración en un índice de SH. Escalas temporales y espaciales.
Garrick y Hall, 2014	Análisis de indicadores e índices compuestos de SH, implementación del riesgo en la SH. Revisión de Dimensiones de SH.
van Beek y Arriens, 2014.	Revisión de dimensiones, análisis y elección de variables e indicadores, escalas de aplicación, ejemplos prácticos de medición y presentación de resultados de un índice de SH.
Rodrigues et al., 2014	Evaluación de la SH desde el enfoque de cuenca, determinando la cantidad de agua y su uso.
Gain et al., 2016	Medición de la SH con un enfoque mundial y su interrelación con los objetivos de desarrollo sostenible.
Asian Development Bank, 2016	Desarrollo de un índice regional Asia Pacífico de SH, análisis de dimensiones, indicadores y variables a nivel país.
Fuster et al., 2017.	Análisis de las definiciones de SH, desarrollo de una definición a nivel país, y propuesta de indicadores e índice de SH con enfoque de cuenca hidrológica.
Assefa et al., 2018	Desarrollo de un índice de SH a una escala local, utilizando variables, indicadores y dimensiones de uso doméstico.
Olivares et al.,2019.	Valoración de la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrológica e implementación de la red carretera como parte de la infraestructura.
Aboelnga et al.,2019	Análisis de dimensiones, indicadores y variables para el desarrollo de un índice de SH a nivel ciudad, con base en las definiciones de las Naciones Unidas.
Cervantes-Jiménez et al.,2020.	Desarrollo de un índice de manejo sustentable del agua a nivel subcuenca, aplicando análisis factorial, utilizando información municipal y de cuenca. Selección de indicadores por criterios de disponibilidad pública, viabilidad temporal y relevancia en las dimensiones cuatro dimensiones básicas de la sustentabilidad.

LITERATURA CITADA

Aboelnga, H.T., Ribbe, L., Frechen, F.B., Saghir, J. 2019. Urban water security: Definition and assessment framework. *Resources*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/resources8040178>

Asian Development Bank. 2016. Asian Water Development Outlook 2016: Strengthening Water Security in Asia and the Pacific. Asian Development Bank.

Assefa, Y.T., Babel, M.S., Sušnik, J., Shinde, V.R. 2018. Development of a generic domestic water security index, and its application in Addis Ababa, Ethiopia. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010037>

- Bakker, K., Dunn, G., Norman, E., Allen, D., Cook, C., Cavalcanti de Albuquerque, R., Simpson, S. 2013. *Water Security Indicators: The Canadian Experience*.
- Cervantes-Jiménez, M., Díaz-Delgado, C., González-Sosa, E., Ángel Gómez-Albores, M., Mastachi-Loza, C.A. 2020. Proposal of a water management sustainability index for the 969 sub-basins of Mexico. *Journal of Maps*, 16(2), 432–444. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1763486>
- Dunn, G., Bakker, K. 2009. Canadian approaches to assessing water : an inventory of indicators. En *Water Governance* (Número November).
- Dunn, G., Cook, C., Bakker, K., Allen, D. 2012. *Water security guidance document*. 154.
- Fuster, R., Escobar, C., Astorga, K., Silva, K., Aldunce, P. 2017. Estudio de Seguridad Hídrica en Chile en un contexto de Cambio Climático para elaboración del Plan de Adaptación de los recursos hídricos al Cambio Climático.
- Gain, A., Giupponi, C., Wada, Y. 2016. Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 11(124015). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- Garrick, D., Hall, J. 2014. *Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways*. Ssrn. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817>
- Olivares, O.S., Burgos, A.L., Ramírez, J.S., Bocco, G. 2019. Valoración de la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrográfica: Aplicación en cuencas rurales del Centro Occidente de México. *Journal of Latin American Geography*, 18(2), 88–119.
- Rodrigues, D.B.B., Gupta, H.V., Mendiondo, E.M. 2014. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resources Research*, 50(9), 7187–7205. <https://doi.org/10.1002/2013WR014274>
- van Beek, E., Arriens, W.L. 2014. Water security: Putting the concept into practice. *TEC Background Papers*, 20, 1–55.
- Watkins David W, J., McConville, J.R., Barkdoll, B.D. 2004. Metrics for sustainable water use. En *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management* (pp. 1–9).
- Zeitoun, M. 2011. The global web of national water security. *Global Policy*, 2(3), 286–296.