

Índices para el monitoreo de cuerpos de agua usando sensores remotos

Index for water body monitoring using remote sensing

¹Rodolfo Hernández Lozano*, ²Numa P. Pavón*

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,
Pachuca, Hidalgo, México, C.P. 42184. Tel.: (771) 7172000, ext.: 6665.

¹Tel. (775) 1979097, he242831@uaeh.edu.mx, ORCID: 0000-0002-2262-3749.

²Tel. (771) 219 4605, npavon@uaeh.edu.mx, ORCID: 0000-0003-0666-5268.

*Autor de correspondencia

Resumen

La sobreexplotación de los cuerpos de agua aunado a las sequías y el impacto del cambio climático reducen el agua disponible para actividades humanas, lo cual genera serios problemas económicos y sociales. Por tanto, una tarea imprescindible es el monitoreo del estado de los cuerpos de agua superficiales, y una alternativa rápida, precisa y económica es hacerlo mediante técnicas de teledetección usando sensores remotos satelitales. Estas técnicas ayudan a obtener información a distancia de un determinado objeto situado sobre la superficie terrestre. El objetivo de este estudio fue, mediante el método PRISMA, realizar una revisión de las aplicaciones de los sensores remotos en el monitoreo de cuerpos de agua para dar alternativas de uso de los índices de agua. El índice de agua modificado de diferencia normalizada (MNDWI, por sus siglas en inglés) y el índice de extracción de agua automatizado (AWEI, por sus siglas en inglés) son los más adecuados debido a que son fáciles de construir e interpretar, además de que tienen alta precisión.

Palabras clave: Teledetección; índices de agua; ríos; sequía; monitoreo de cuerpos de agua.

Abstract

Water bodies' overexploitation, droughts, and the impact of climate change are reducing water availability for human activities. Due to the above, severe economic and social problems occur. Therefore, an essential task is to monitor the state of surface water bodies. For this, a fast, accurate, and economical alternative is doing so through remote sensing techniques using satellite remote sensors. These techniques help obtain information at a distance from a specific object on the earth's surface. The objective of this study was to review, using PRISMA method, the applications of remote sensors in monitoring water bodies to provide alternatives for using water indices. The modified normalized difference water index (MNDWI) and the automated water withdrawal index (AWEI) are the best suited options, because they are easy to construct and interpret; additionally, they have high precision.

Keywords: Remote sensing; water indices; rivers; drought; monitoring.

Recibido: 08 de marzo de 2023

Aceptado: 01 de diciembre de 2023

Publicado: 06 de marzo de 2024

Cómo citar: Hernández Lozano, R., & Pavón, N. P. (2024). Índices para el monitoreo de cuerpos de agua usando sensores remotos. *Acta Universitaria* 34, e3814. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2024.3814>

Introducción

Tradicionalmente, el monitoreo y delimitación de cuerpos de agua superficiales como ríos, lagos y reservorios se ha realizado a través del procesamiento de fotografías aéreas, modelos de elevación, técnicas topográficas y el uso de la morfometría clásica (Castillo, 2003; Rico *et al.*, 1995; Tassew *et al.*, 2021). Esta última define el contorno de los cuerpos de agua por medio de sus coordenadas cartesianas, sobre las cuales se toman una serie de medidas de dimensiones y distancias, así como combinaciones de ellas (Castillo, 2003). Aunque estas técnicas se siguen utilizando, el uso de sensores remotos es cada vez más frecuente y con ello la aparición de una serie de índices que permiten realizar descripciones más precisas y comparaciones entre sitios. La teledetección mediante sensores remotos genera información a distancia de un objeto determinado y está basado en las propiedades de la radiación electromagnética en su interacción con los materiales de la superficie terrestre (Romero, 2006).

Los sensores remotos se encuentran instalados a bordo de una plataforma, tales como satélites (por ejemplo: LANDSAT, METEOSAT y SPOT), aviones o drones. En general, registran la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie de un objeto; es decir, miden la reflectancia en más de 200 bandas del espectro. Los datos obtenidos se procesan mediante los sistemas de información geográfica (SIG) y se analizan mediante diversos índices (Ariza *et al.*, 2018).

Entre los índices más utilizados destacan el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés), que ha sido aplicado para evaluar la variabilidad interanual y estacional de la extensión del agua superficial (Tulbure *et al.*, 2016); el índice de agua modificado de diferencia normalizada (MNDWI, por sus siglas en inglés), que se ha utilizado para observaciones a largo plazo de los cambios en el agua en lagos (Yudha, 2023); el índice de aguas superficiales terrestres (LSWI, por sus siglas en inglés), que ha sido empleado para medir la humedad del suelo (Nadeem *et al.*, 2023); y el índice de extracción de agua automatizado con sombra (AWEIsh, por sus siglas en inglés) y sin sombra (AWEInsh, por sus siglas en inglés), usado principalmente para el monitoreo eficiente y continuo de las aguas superficiales (Yue *et al.*, 2023). Estos índices se han utilizado en diversas investigaciones sobre cuerpos de agua alrededor del mundo, algunos de ellos han sido probados de forma simultánea en un solo estudio. En los últimos trece años se han publicado 2824 trabajos donde se utiliza algún índice para agua, de acuerdo con resultados de la búsqueda realizada en febrero de 2023 en diversos motores especializados.

A pesar de su utilidad, al parecer en México el uso de estos índices es aún insipiente. El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión de literatura para evaluar el uso de los índices de agua en México y proponer los más adecuados de acuerdo al tipo de estudio. En particular, el trabajo se enfocó en los índices relacionados con la delimitación de cuerpos de agua con el fin de prevenir la sobreexplotación y prevenir riesgos por sequías en México.

Materiales y métodos

Se realizó la búsqueda de literatura de forma sistemática, con base en la lista de verificación PRISMA (Page *et al.*, 2021; Urrútia & Bonfill, 2010). Las pautas PRISMA comprenden etapas bien definidas para la revisión sistemática, con el fin de establecer los criterios de elegibilidad a partir de las fuentes de información, estrategias de búsqueda, procesos de selección y datos valiosos. Se aplicaron criterios de elegibilidad clasificando las bases de datos y fuentes de información, utilizando como estrategias de búsqueda palabras clave en inglés y español como: "NDWI", "MNDWI", "LSWI", "AWEI", "water index" y "water bodies", en las bases de datos Scopus, Web of Science, PubMed y Google Scholar. También se usaron operadores de Boolean (and, or, and not). La búsqueda de literatura sólo se realizó para trabajos realizados en México, en un periodo comprendido entre los años 2010 y 2022. Se realizó un proceso de selección riguroso de los estudios que cumplen los criterios de inclusión, para posteriormente realizar la extracción de datos.

De acuerdo con la metodología PRISMA, en total se obtuvieron 3 673 referencias relacionados con el tema. Usando el programa Endnote se eliminaron referencias duplicadas, para posteriormente formar grupos utilizando palabras clave, a través de herramientas de aprendizaje automático (Endnote), de esta forma se refinaron los estudios relevantes. La siguiente forma de elegibilidad fue retirando manualmente aquellos trabajos realizados fuera de México, siendo este un criterio de exclusión. En total se seleccionaron 40 trabajos publicados en los que utilizan uno o más índices para el análisis de cuerpos de agua

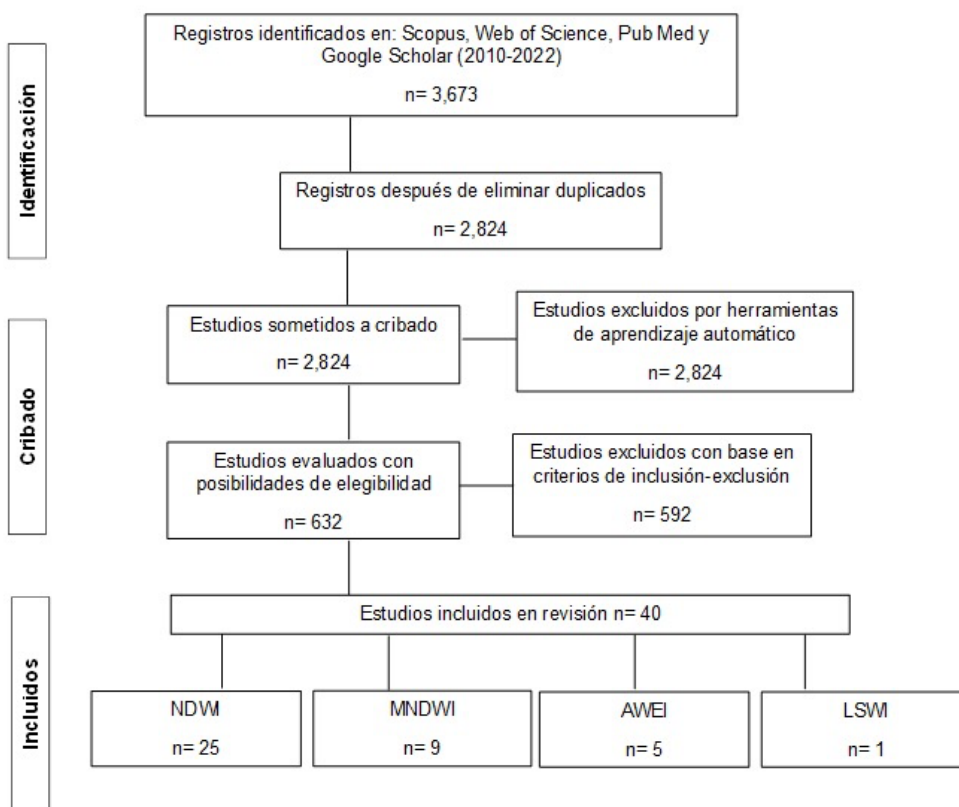


Figura 1. Diagrama de flujo basado en la metodología PRISMA, utilizado para la revisión sistemática de referencias.

Nota. NDWI: índice de agua de diferencia normalizada; MNDWI: índice de agua modificado de diferencia normalizada; LSM: índice de aguas superficiales terrestres; AWEI: índice de extracción de agua automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

Estrés en cuerpos de agua superficiales

La escasez hídrica es un problema mundial, cerca del 50% de la población mundial sufren de condiciones de escasez de agua severa, al menos durante un mes al año (Mekonnen & Hoekstra, 2016), mientras que 1.6 mil millones de personas se enfrentan a la escasez económica de agua (UNESCO-ONU-Agua, 2020).

Por su parte, México sufre de escasas de agua, en particular en zonas del centro y norte del país. Debido a la alta densidad de población en las ciudades y al aumento de la urbanización, el suministro de agua es particularmente vulnerable. En 2022, la ciudad de Monterrey estuvo en crisis debido a la falta de lluvias y a la disminución del agua en las presas (El Cuchillo, Cerro Prieto y la Boca) que suministran agua a la ciudad. Es así que los estudios sobre la variabilidad en los depósitos de agua naturales son cada vez más necesitados como información básica en planes de manejo y política pública.

La escasez de agua es a menudo un fenómeno estacional; sin embargo, esto podría verse afectado por el cambio climático. Para el año 2050, alrededor de 685 millones de personas, viviendo en más de 570 ciudades, podrían enfrentar una disminución adicional de disponibilidad de agua dulce de por lo menos 10% (UNESCO-ONU-Agua, 2020).

Para el 2017, en los estados de Nayarit, Michoacán, Sinaloa y Guerrero hubo menos lluvias que en años anteriores, y por cuarto año consecutivo la precipitación pluvial anual fue menor a la normal (1981-2010) (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2018). Hasta el 31 de agosto del 2019, el Monitor de Sequía de México registró que el 66% del territorio mexicano tenía sequía, siendo Oaxaca y Veracruz los estados con los niveles más altos (Conagua, 2019). Por otro lado, para el año 2015, el 16.07% de los acuíferos del país estaban sobrexplotados (Martínez *et al.*, 2019) debido, principalmente, al uso de agua para riego. A últimas fechas el inicio de la estación de lluvias ha mostrado retrasos.

Estos fenómenos han generado un impacto negativo en la producción agrícola. La disminución de las lluvias ha afectado grandes extensiones agrícolas, tanto de riego como de temporal, propiciando severos desajustes a la economía regional y nacional (Velasco *et al.*, 2005). En particular, la producción del maíz ha sido perjudicada; por ejemplo, en Guanajuato y Querétaro disminuyó en 153 000 toneladas, además de que 163 mil hectáreas de las 271 mil sembradas resultaron siniestradas (Landa *et al.*, 2008).

Cambio climático y su rol en la intensificación de sequías

El grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático reporta en su sexto informe que la temperatura mundial se ha incrementado 0.99 °C con respecto al periodo 1850-1900 (Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC], 2023). Aunado a esto, la frecuencia de meteorológicos extremos se ha incrementado, exponiendo a millones de personas. La reducción de la seguridad hídrica que sufren muchas regiones en el planeta es uno de los factores que más repercuten en la vulnerabilidad. La mortalidad humana por inundaciones, sequías y tormentas fue, entre 2010 y 2015, 15 veces mayor en regiones altamente vulnerables, en comparación con regiones con vulnerabilidad muy baja (IPCC, 2023).

El impacto del calentamiento global sobre la persistencia de cuerpos de agua continental se ha convertido en un tema emergente de gran importancia (Abbaspour *et al.*, 2012; Jeppesen *et al.*, 2015; Krinner & Boike, 2010; Mozafari *et al.*, 2022). Los lagos y otros cuerpos de agua superficiales representan ecosistemas sensibles y altamente vulnerables al cambio climático, aunque tienen una importancia medular en la regulación del clima; en latitudes altas permiten disminuir la temperatura durante el verano (Caballero & Vázquez, 2019; Krinner & Boike, 2010).

Por otro lado, las sequías se intensifican debido al cambio climático (Magaña & Neri, 2012), lo que disminuye el agua disponible para las actividades humanas y pone en riesgo la producción de alimentos. En México, los estados del noroeste y del altiplano mexicano son los que tienen mayor vulnerabilidad a sequías (Ortega *et al.*, 2018). Estas zonas son áridas, así que históricamente han sufrido escasez de agua, con impactos negativos en su población y en sus actividades económicas. Ureta *et al.* (2020) han señalado que la producción de maíz se verá significativamente afectada, donde sólo los campos bajo riego podrán permanecer. Sin embargo, la mayor parte de agua para riego se extrae de acuíferos, los cuales en gran parte están sobre explotados.

Técnicas de teledetección

Los sistemas de teledetección obtienen información mediante los sensores remotos. Estos sensores son sistemas o instrumentos utilizados para recolectar información rápida y viable de un objeto, área o fenómeno a distancia. Se encuentran instalados a bordo de una plataforma y registran la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie de un objeto en distintas bandas del espectro electromagnético. Estos registros incluyen longitudes de onda, desde las más cortas (gamma y radiográficas) hasta las más largas (microondas y de radiodifusión). Dentro de las longitudes de onda más cortas está la ultravioleta (Veneros *et al.*, 2020).

La teledetección ha sido crucial para promover la comprensión científica de los sistemas terrestres y acuáticos de la Tierra desde el rápido avance de la tecnología satelital y el procesamiento de imágenes digitales que se produjo entre los años 60 y 70 del siglo pasado. Para la década de 1990 a 2000 se dio un amplio desarrollo de sistemas globales de detección remota. Entre otros, la serie Landsat de la NASA se lanzó a partir de 1972, y Terra-1 se lanzó en 1999 (satélites más recientes como la serie Landsat 8 siguen siendo muy utilizados). Estos sensores han permitido el monitoreo de los cambios en los entornos y ecosistemas de la Tierra. En la Tabla 1 se presentan algunas de las características de los sensores remotos del Landsat 8.

La complejidad intrínseca y la naturaleza dinámica de los sistemas terrestres han hecho que esos sistemas sean difíciles de estudiar, especialmente en grandes extensiones espaciales. Datos de sensores remotos son útiles para caracterizar los gradientes en el paisaje o los cambios ambientales a lo largo del tiempo, al proporcionar indicadores cuantificables y medidas biofísicas. La teledetección, la tecnología geoespacial, los sistemas de información geográfica (SIG), el análisis espacial y el modelado son herramientas metodológicas que se han empleado ampliamente en diversos tipos de estudios de cambio global (Pricope *et al.*, 2019).

Tabla 1. Características de la serie Landsat 8, sensor OLI.

Banda	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)
1(azul profundo)	430-450	
2(Azul)	450-510	
3(Verde)	530-590	
4(Rojo)	640-670	30
5(NIR)	850-880	
6(SWIR1)	1570-1650	
7(SWIR2)	2110-2290	
8(Pancromático)	500-680	15
9(Cirrus)	1360-1380	30
10(TIRS1)	10 600-11 900	100
11(TIRS2)	11 500-12 510	

Nota. NIR: infrarrojo cercano; SWIR: infrarrojo de onda corta; TIRS: infrarrojo térmico; OLI: generador de imágenes terrestres operacionales.
Fuente: Elaboración propia con base en tabla de Asfaw *et al.* (2020).

Índices basados en teledetección

La teledetección se realiza a través de más de 200 bandas que detectan la longitud de onda de los objetos de interés. Estas bandas pueden combinarse, resultando en una serie de índices útiles para comprender el comportamiento de la superficie evaluada. Los índices son ecuaciones matemáticas o proporciones de bandas espectrales diseñados para identificar relaciones funcionales y de cambio entre diversas superficies (Kasampalis *et al.*, 2018). Son notorias las diferencias entre una imagen satelital al natural de un cuerpo de agua y una imagen en la cual se resalta mediante un índice como el NDWI (Figura 2).



Figura 2. Imagen natural (a) e imagen con índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) (b) de la laguna San Antonio Atocha, municipio de Apan, Hidalgo, México.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de Landsat 8.

Monitoreo de recursos hídricos superficiales

Las técnicas de teledetección aplicadas son una alternativa viable para monitorear cuerpos de agua. Los datos satelitales pueden proporcionar información en tiempo real, de forma dinámica y rentable, lo que puede brindar un monitoreo operativo (autónomo) de los recursos hídricos (Bangira *et al.*, 2019).

Los índices de agua y humedad juegan un papel importante en el monitoreo de aguas superficiales. Partiendo de la teoría de que el agua absorbe casi todo el flujo radiante incidente y que la superficie terrestre refleja cantidades significativas de energía en las bandas del infrarrojo de onda corta y cercana, la reflectancia medida en la banda verde es mucho mayor para el agua en comparación con la reflectancia de la superficie terrestre (Arreola-Esquivel *et al.*, 2019).

Índices de agua

La determinación de una ecuación matemática o fórmula específica con diversas bandas da como resultado una variedad de índices, aplicados bajo distintos enfoques en el estudio de cuerpos de agua (Tabla 2).

Tabla 2. Aplicaciones de los índices de agua.

Índice	Fórmula	Aplicación
NDWI	$\frac{\text{Verde} - \text{NIR}}{\text{Verde} + \text{NIR}}$	Cuantifica el cambio CAS
		Mide el grado de extracción CAS
		Ocurrencia de sequías
		Clasifica los tipos de cobertura de suelo CAS
MNDWI	$\frac{\text{Verde} - \text{NIR}_1}{\text{Verde} + \text{NIR}_1}$	Mide extracción de CAS
		Mapeo de CAS en cuenca
		Detecta cambios en nivel de CAS y cuencas
		Mide dinámica de aguas
LSWI	$\frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$	Monitoreo de la fenología de la vegetación
		Comprensión integral del paisaje
		Cartografiar masas de CAS
		Análisis del contenido de agua en plantas y suelo
AWEI	$4 \times (\text{Verde} - \text{SWIR}_1) - 0.25 \times \text{NIR} + 2.75 \times \text{SWIR}_2$	Mapeo de CAS
		Mide extracción de CAS
		Mide masas de CAS
		Usado para delinear la erosión costera

Nota. Las longitudes de ondas de cada banda utilizada se presentan en la Tabla 1.

NIR: infrarrojo cercano; SWIR: infrarrojo de onda corta; CAS: cuerpos de agua superficiales; NDWI: índice de agua de diferencia normalizada; MNDWI: índice de agua modificado de diferencia normalizada; LSWI: índice de aguas superficiales terrestre; AWEI: índice de extracción de agua automatizado.

Fuente: Elaboración propia con información de Bhaga *et al.* (2020) y Asfaw *et al.* (2020).

A continuación, se detallan los índices más utilizados en cuanto a su aplicación, precisión y limitaciones en el monitoreo de aguas superficiales.

Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

El NDWI utiliza el valor de la banda verde menos la banda del infrarrojo cercano (NIR), dividido por la suma de las dos bandas (McFeeters, 1996), obteniendo como resultado valores positivos de las características del agua; por lo tanto, se resaltan estas características. La superficie terrestre tiene valores cero o negativos y se suprime o elimina. Sin embargo, en las imágenes NDWI los cuerpos de agua a menudo se mezclan con ruidos de terrenos urbanizados, debido a las características de reflectancia similares en las bandas verde y NIR, entre el agua y el terreno urbanizado.

Este índice es sensible a los cambios en el contenido de agua en el dosel de la vegetación, debido a la reflectancia a 857 nm y 1241 nm. Lo anterior se debe a las propiedades de absorción de agua líquida, que es ligeramente diferente. El valor de este índice varía de -1 a 1. Los valores menores a 0 están asociados a superficies brillantes sin presencia de agua, mientras que los valores mayores a 0 indican presencia de agua; cuanto más se acerca a 1, el valor mayor es el contenido o presencia de agua.

En México, este índice ha sido utilizado para mediar la variabilidad de los lagos de la faja volcánica transmexicana en periodos inter e intra- anuales (Chapala *et al.*, 2015); de igual forma, fue aplicado para calcular la superficie de agua y el área de cambio del Lago Chapala en Jalisco (Tapia-Silva & López-Caloca, 2018). Otra aplicación de este índice fue el mapeo de presas de jales en el estado de Sonora (Dávila *et al.*, 2018).

Índice de agua modificado de diferencia normalizada (MNDWI)

Este índice fue modificado por Xu (2006), sustituyendo la reflectancia en el infrarrojo cercano por la reflectancia en el infrarrojo medio (MIR) y sugiere la modificación del NDWI, denominado como índice de agua modificado de diferencia normalizada. Xu (2006) observó que este índice es más preciso delineando la humedad del perímetro que el índice NDWI; el índice modificado puede eliminar los píxeles de ruido, representando el paisaje urbano que ocurre en el fondo de la humedad. Las imágenes salidas a partir del índice MNDW presentan valores que van de -1 a 1, donde los valores menores a 0 están asociados a superficies brillantes sin presencia de agua. Los valores mayores a 0 indican presencia de agua, y los valores cercanos a 1 indican que el contenido o presencia de agua es mayor, lo que ayuda a generar un estimado del agua del sitio estudiado (El-Asmar *et al.*, 2013).

El MNDWI en México ha sido utilizado para detectar pozos de agua en Baja California (Escobar-Flores *et al.*, 2017), para delimitar cuerpos de agua en Xochimilco y Chihuahua (Zamora-Rivas, 2019), para identificar los cambios de extensión de cuerpos de agua (Mullen & Muller, 2020; Rojas-Villalobos *et al.*, 2022) y para identificar áreas de inundación para su reencauzamiento (Sánchez *et al.*, 2021).

Índice de aguas superficiales terrestres (LSWI)

LSWI es un índice presentado por Menarguez (2015), utiliza regiones del infrarrojo cercano (NIR) y regiones del infrarrojo de onda corta (SWIR) del espectro electromagnético para evaluar el estrés hídrico. Las moléculas de agua líquida en el dosel de la vegetación que interactúan con la radiación solar se miden mediante LSWI; por lo tanto, también se sabe que es sensible a la cantidad total de líquido de vegetación y para el fondo del suelo. Fue desarrollado para identificar inundaciones y cuerpos de agua. En México, LSWI ha sido utilizado, en general, en el monitoreo de cuerpos de agua superficiales (Tottrup *et al.*, 2022).

Índice de extracción de agua automatizado con sombra (AWEIsh) y sin sombra (AWEInsh)

AWEI fue propuesto por Feyisa *et al.* (2014) y puede detectar cuerpos de agua. Incluye dos índices: AWEInsh, que se aplica cuando no hay sombras, y AWEIsh, que se aplica para distinguir entre píxeles posteriores y píxeles de sombra. El índice fue diseñado para la extracción de agua superficial con precisión mejorada. Los coeficientes usados y las combinaciones de las bandas elegidas se determinaron con base en un examen crítico de las propiedades de reflectancia de varios tipos de coberturas terrestres.

El índice AWEI ha sido utilizado en México para detectar cambios en cuerpos de agua en el Lago de Chapala, Jalisco (Calvario *et al.*, 2017), para el monitoreo (Wang *et al.*, 2018) y discriminación de cuerpos de agua (Calvario *et al.*, 2018), así como en la extracción (Arreola-Esquivel *et al.*, 2019) y detección (Soria-Ruiz *et al.*, 2022) de cuerpos de agua.

Resultados

Los productos de los sensores remotos son relativamente recientes en México, se empezaron a utilizar en el año 2015 (Figura 3). En general, NDWI es el índice más utilizado (25 estudios), seguido de MNDWI (nueve estudios). Por otro lado, poco se han utilizado los índices AWEI y LSWI (cinco estudios y un estudio, respectivamente).

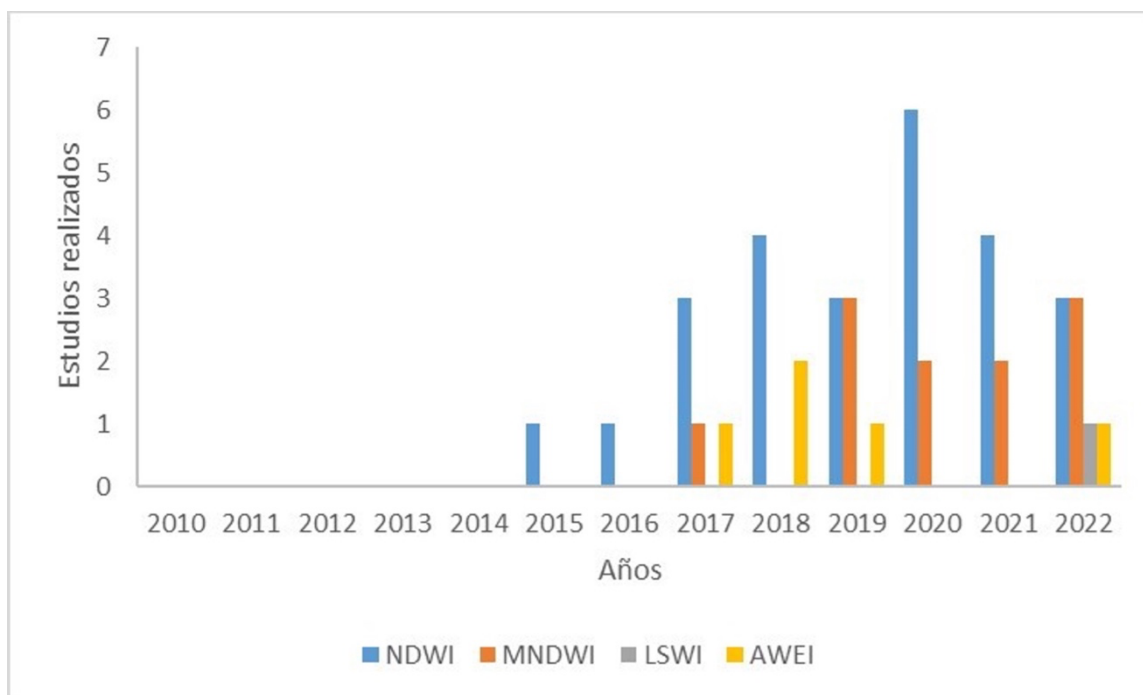


Figura 3. Índices en monitoreo de cuerpos de agua utilizados en México.
Fuente: Elaboración propia.

En los estudios realizados en México, la temporalidad utilizada se puede englobar en dos grupos de manera general: los estudios hechos con datos interanuales (clasificados por condiciones secas y húmedas, por épocas del año o simplemente por los distintos meses del año), que son los más comunes en México (20 estudios), y los estudios realizados con datos anuales (comparación de años consecutivos y no consecutivos en distintas temporadas, en periodos desde dos años hasta más de 30) (17 estudios realizados); también se cuenta con un estudio donde se abordan series temporales anuales e interanuales (Tabla 3).

Las imágenes satelitales más utilizadas en México son las imágenes Landsat, empleadas en 23 estudios, seguido de las imágenes Sentinel, con 10 estudios, y las imágenes SPOT, con un solo reporte. También se han utilizado imágenes satelitales de distintas plataformas de manera simultánea en el mismo estudio, la combinación más común son Landsat y Sentinel (cuatro estudios), mientras que la combinación de imágenes de Modis y Landsat solo se ha realizado en un estudio (Tabla 3).

La información recabada a través de los índices muchas veces puede ser complementada o verificada con datos *in situ*. En el caso de los estudios realizados en México, solamente tres integran información recopilada en campo. Por otra parte, la integración de mapas de calor solamente ha sido aplicado en cuatro estudios (Tabla 3).

Tabla 3. Información detallada de los estudios realizados en México.

Índice	Referencia	Temporalidad	Imágenes utilizadas	¿Integra datos <i>in situ</i> ?	¿Hace uso de mapas de calor?
NDWI	Chapala <i>et al.</i> (2015)	Anual	Landsat	Sin dato	Sin dato
	Castilla (2016)	Interanual	Landsat	No	Sí
	Noyola-Medrano & Martínez-Sías (2017)	Anual	Landsat	Sí	Sí
	Luna (2017)	Interanual	Sentinel	No	No
	Gómez-Palacios <i>et al.</i> (2017)	Interanual	SPOT	No	No
	Colditz <i>et al.</i> (2018)	Interanual	MODIS - Landsat	No	No
	Luna <i>et al.</i> (2018)	Interanual	Sentinel	No	No
	Tapia-Silva & López- Caloca (2018)	Anual	Landsat	Sí	No
	Sánchez <i>et al.</i> (2018)	Interanual	Landsat	No	No
	Zamora-Rivas (2019)	Anual	Landsat	No	No
	Leal <i>et al.</i> (2019)	Anual	Landsat	No	No
	López <i>et al.</i> (2019)	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
	Escobar-Flores <i>et al.</i> (2017)	Interanual	Sentinel	Sí	No
	Sandoval <i>et al.</i> (2020)	Interanual	Sentinel	No	No
	Sandoval & Escobar-Flores (2020)	Anual	Landsat	No	No
	Wickel <i>et al.</i> (2020)	Anual e interanual	Landsat	No	No
	Pech <i>et al.</i> (2020)	Anual	Sentinel	No	No
	Saiz-Rodríguez, (2020)	Interanual	Landsat	No	Sí
	Castro-Lazcarro <i>et al.</i> (2021)	Anual	Landsat	No	No
	Sedeño-Díaz & López-López (2021)	Anual	Landsat	No	No
	Fernández <i>et al.</i> (2021)	Sin dato	Sentinel	Sin dato	Sin dato
	Murray & Khaki (2021)	Interanual	Landsat	No	No
	Sánchez <i>et al.</i> (2021)	Interanual	Sentinel	No	No
Del-Toro-Guerrero <i>et al.</i> (2022)	Anual	Landsat	No	No	
Tottrup <i>et al.</i> (2022)	Anual	Sentinel y Landsat	No	No	
MNDWI	Escobar-Flores <i>et al.</i> (2017)	Interanual	Landsat	No	No
	Zamora-Rivas (2019)	Anual	Landsat	No	No
	Rojas-Villalobos (2019)	Interanual	Landsat	No	No
	Arreola-Esquivel <i>et al.</i> (2019)	Anual	Landsat y Sentinel	No	No
	Mullen & Muller (2020)	Interanual	Landsat	No	No
	Saiz-Rodríguez, (2020)	Interanual	Landsat	No	Sí
	Sánchez <i>et al.</i> (2021)	Interanual	Sentinel	No	No
Rojas-Villalobos <i>et al.</i> (2022)	Interanual	Landsat	Sin dato	No	
LSWI	Maldonado (2022)	Anual	Landsat	No	No
	Tottrup <i>et al.</i> (2022)	Anual	Sentinel y Landsat	No	No
AWEI	Calvario <i>et al.</i> (2017)	Anual	Landsat	No	No
	Wang <i>et al.</i> (2018)	Interanual	Sentinel	No	No
	Sánchez <i>et al.</i> (2018)	Interanual	Landsat	No	No
	Arreola-Esquivel <i>et al.</i> (2019)	Anual	Landsat y Sentinel	No	No
	Soria-Ruiz (2022)	Interanual	Sentinel	No	No

Nota. Las columnas con la leyenda "sin dato" son estudios a los que no se tuvo acceso al documento completo, simplemente se recopiló la información del resumen y no se encontró el dato en cuestión.

Fuente: Elaboración propia con base en la información de los estudios realizados en México.

Discusión

Es importante conocer características relevantes de los diferentes índices de agua usados actualmente, como su precisión y sus limitantes, ya que estos datos pueden ser de gran interés para la selección y aplicación de los mismos. La precisión de los índices puede verse afectada por la ubicación y el tiempo en el que se adquirió la imagen (Jiang *et al.*, 2014), así como la incertidumbre del método de corrección atmosférica aplicado, la turbidez del agua, la clase de cobertura de fondo y el tipo de sensor (Asfaw *et al.*, 2020). Aquí ofrecemos una comparación de la precisión de los índices de agua reportada por distintos autores, así como sus limitantes (Tabla 4).

Tabla 4. Precisión y limitaciones reportadas en estudios previos.

Índice	Precisión (%)	Tipo de limitante	Referencia
NDWI	NA	1	El-Asmar <i>et al.</i> (2013)
	77	2	Masocha <i>et al.</i> (2018)
	NA	3	Orimoloye <i>et al.</i> (2019)
	91	4	Asfaw <i>et al.</i> (2018)
	NA	5	Fujihara <i>et al.</i> (2020)
MNDWI	NA	1	El-Asmar <i>et al.</i> (2013)
	78.4	6	Malahlela (2016)
	84.3	7	Masocha <i>et al.</i> (2018)
	99	6	Asfaw <i>et al.</i> (2018)
	97.4	9	Ndehedehe <i>et al.</i> (2020)
LSWI	87.1	8	Slagter <i>et al.</i> (2020)
	NA	5	Jin <i>et al.</i> (2013)
	82.6	10	Benefoh <i>et al.</i> (2018)
	NA	11	Ali <i>et al.</i> (2020)
AWEI	79.3	8	Feyisa <i>et al.</i> (2014)
	NA	6	Malahlela (2016)
	81.6	5	Masocha <i>et al.</i> (2018)
	99.2	5	Asfaw <i>et al.</i> (2018)
	NA	5	Darladi <i>et al.</i> (2020)
	98	12	Herndon <i>et al.</i> (2020)

Nota. Tipos de Limitantes: 1) Ajustar los ángulos solares; 2) No suprime la señal de las características construidas de manera eficiente; 3) No consideró el tipo de suelo, la ubicación geográfica ni el clima de la zona; 4) Zonas urbanas con alta reflectancia; 5) Confusión con áreas edificadas; 6) Clasificación de sombras; 7) Mayor rendimiento en áreas con vegetación; 8) Menor rendimiento en áreas con vegetación; 9) Sensibilidad en agua de suelos; 10) Baja presión en regiones secas; 11) Nubosidad afecta resultado; 12) Ruido de fondo afecta resultados. Abreviaturas: NDWI: índice de agua de diferencia normalizada; MNDWI: índice de agua modificado de diferencia normalizada; LSWI: índice de aguas superficiales terrestres; AWEI: índice de extracción de agua automatizado.

Fuente: Elaboración propia con información de Bhaga *et al.* (2020).

Comparando los limitantes reportados, se encontró que el error más común es la confusión con las áreas edificadas, ya que tres índices de los cuatro evaluados lo reportaron; sólo MNDWI no reportó ese error. El segundo tipo de limitante más frecuente fue el menor rendimiento en áreas con vegetación, reportado en los índices MNDWI y AWEI; este tipo de limitante no fue reportado para los índices NDWI y LSWI.

En cuanto a las precisiones reportadas, los valores más altos fueron para los índices de AWEI y MNDWI, con 99.2% y 99%, respectivamente. La presión fue evaluada con puntos de control en tierra (Asfaw *et al.*, 2020).

Resulta de gran relevancia conocer las limitantes reportadas de cada uno de los índices utilizados para el monitoreo de cuerpos de agua superficiales, así como su porcentaje de precisión, para de esta manera poder elegir el índice adecuado de acuerdo con las características del sitio bajo evaluación.

La aplicación de sensores remotos, y en específico de índices de agua, es una herramienta valiosa para el monitoreo de cuerpos de agua en la actualidad, ya que permite cuantificar el cambio, el grado de extracción y la ocurrencia de sequías, así como clasificar los tipos de cobertura de suelo, medir la dinámica de aguas, monitorear la fenología de la vegetación y analizar el contenido de agua en plantas y suelo (Ali *et al.*, 2020; Asfaw *et al.*, 2018; El-Asmar *et al.*, 2013; Jin *et al.*, 2013; Masocha *et al.*, 2018).

Usando índices de agua se ha logrado una mejor comprensión integral del paisaje. No obstante, es necesario conocer los tipos de limitantes reportados para estos índices (Bhaga *et al.*, 2020); por ejemplo, lo más común fue la confusión con áreas edificadas y sombras, por lo que éstas pueden ser clasificadas como cuerpos de agua. Una limitante más fue un bajo rendimiento en áreas con vegetación. Debido a estos factores, existe el consenso de que no hay un índice de agua específico que sea totalmente robusto, estable y aplicable de manera eficiente para todos los cuerpos de agua en todas las circunstancias. Sin embargo, AWEI y MNDWI registran un alto porcentaje de precisión, por lo que podrían constituir una de las primeras opciones a considerar en el estudio de cuerpos de agua.

Actualmente, el cambio climático tiene importantes repercusiones en los cuerpos de agua superficiales de todo el mundo, aumentando los peligros relacionados con el agua. Es así que monitorear constantemente los cuerpos de agua superficiales, como lagos, lagunas y ríos, es una tarea fundamental que funciona como una solución de alerta temprana para prevenir conflictos de seguridad alimenticia y riesgos como inundaciones o sequías.

El uso de sensores remotos representa una forma viable para ese monitoreo por encima del monitoreo *in situ*, que es más caro y complejo logísticamente. A largo plazo, el monitoreo permitirá la planificación de estrategias de mitigación y adaptación ante sequías. Es así que el uso de datos satelitales para monitorear cuerpos de agua superficiales está aumentando, debido a su capacidad para realizar observaciones repetibles y de bajo costo (Li *et al.*, 2013).

Un desafío importante de los datos satelitales es el ruido de fondo, que influye negativamente en la clasificación de las zonas de uso del suelo. Otro desafío del uso de datos de teledetección son las incertidumbres de los sensores, razón por la cual se desarrollaron modelos e indicadores para la evaluación de la incertidumbre de los datos satelitales. Sin embargo, con el desarrollo continuo de algoritmos y el libre acceso a datos satelitales, existe un enfoque prometedor para monitorear los impactos y la aparición de sequías y otros cambios climatológicos.

En México, la aplicación de sensores remotos y sus productos en el monitoreo de cuerpos de agua es limitado, como se muestra en este trabajo. México es un país vulnerable a sequías que ponen en riesgo el acceso a este importante líquido vital y, por consiguiente, a la seguridad alimentaria. La mayor parte del agua dulce del país se transforma en alimento, por lo que puede ser considerado de seguridad nacional. En este sentido, los sensores remotos proporcionan importante información sobre las condiciones pasadas, actuales y futuras de los cuerpos de agua, ayudando a comprender el comportamiento del calentamiento global en los mismos, sirviendo como base de estrategias para la conservación de cuerpos de agua superficial. El uso de índices representa una herramienta importante para estandarizar metodologías que permitan realizar un seguimiento a largo plazo de las variaciones de los cuerpos de agua y comparar entre sitios.

Conclusiones

Los cuerpos de agua continentales representan depósitos importantes para mantener procesos ecológicos y el bienestar humano. Sin embargo, el uso irracional del agua contenido en estos depósitos y el calentamiento global han impactado tanto que ponen en riesgo su conservación. Por lo anterior, el monitoreo es una acción básica para evaluar los impactos y las estrategias de conservación. En este trabajo se analizaron índices generados con información de sensores remotos. Considerando su precisión, se recomienda el utilizar el índice de agua modificado de diferencia normalizada (MNDWI) y el índice de extracción de agua automatizado (AWEI) para realizar monitoreo de cuerpos de agua continentales en México.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Elena Ma. Otazo Sánchez por sus comentarios al manuscrito. Se agradece a Conacyt por la beca para estudios de doctorado otorgada a Rodolfo Hernández Lozano (CVU 1234129).

Conflicto de interés

Los autores no tienen ningún conflicto de interés.

Referencias

- Abbaspour, M., Javid, A. H., Mirbagheri, S. A., Ahmadi Givi, F., & Moghimi, P. (2012). Investigation of lake drying attributed to climate change. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 257-266. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0031-0>
- Ali, D. A., Deininger, K., & Monchuk, D. (2020). Using satellite imagery to assess impacts of soil and water conservation measures: evidence from Ethiopia's Tana-Beles watershed. *Ecological Economics*, 169, 106512. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106512>
- Ariza, A., Roa, O. J., Serrato, P. K., & León, H. A. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23, 105-122. <https://doi.org/10.19053/01233769.5863>
- Arreola-Esquivel, M., Delgadillo-Herrera, M., Toxqui-Quitl, C., & Padilla-Vivanco, A. (2019). Index-based methods for water body extraction in satellite data. *Proceedings of Spie*, 111372N. <https://doi.org/10.1117/12.2529756>
- Asfaw, W., Haile, A. T., & Rientjes, T. (2020). Combining multisource satellite data to estimate storage variation of a lake in the Rift Valley Basin, Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89, 102095. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102095>
- Asfaw, A., Simane, B., Hassen, A., & Bantider, A. (2018). Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: a case study in Woleka sub-basin. *Weather and Climate Extremes*, 19, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.002>
- Bangira, T., Alfieri, S. M., Menenti, M., & van Niekerk, A. (2019). Comparing thresholding with machine learning classifiers for mapping complex water. *Remote Sensing*, 11(11), 1351. <https://doi.org/10.3390/rs11111351>
- Benefoh, D. T., Villamor, G. B., van Noordwijk, M., Borgemeister, C., Asante, W. A., & Asubonteng, K. O. (2018). Assessing land-use typologies and change intensities in a structurally complex Ghanaian cocoa landscape. *Applied Geography*, 99, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.027>
- Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., & Shoko, C. (2020). Impacts of climate variability and drought on surface water resources in sub-Saharan Africa using remote sensing: a review. *Remote Sensing*, 12(24), 4184. <https://doi.org/10.3390/rs12244184>
- Caballero, M., & Vázquez, G. (2019). Lagos como sensores de cambio climático: el caso de La Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 22, 1-8. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.193>
- Calvario, G., Hernández, C., Lazkano, E., Sierra, B., Dalmau, O., & Alarcón, T. (2017). Machine learning approach to fuse multiple band for water bodies detection. *3rd International Conference on Computer Science Networks and Information Technology*, August 26-27, Montreal, Canada. https://www.researchgate.net/profile/Gabriela-Calvario-2/publication/321151332_MACHINE_LEARNING_APPROACH_TO_FUSE_MULTIPLE_BAND_FOR_WATER_BODIES_DETECTION/links/5a11d120a6fdccc2d79b64db/MACHINE-LEARNING-APPROACH-TO-FUSE-MULTIPLE-BAND-FOR-WATER-BODIES-DETECTION.pdf
- Calvario, G., Dalmau, O., Alarcón, T. E., Sierra, B., & Hernández, C. (2018). Selection and fusion of spectral indices to improve water body discrimination. *IEEE Access*, 6, 72952-72961. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881430>
- Castilla, J. L. (2016). IPICIM: Módulo clasificador de imágenes ópticas multiespectrales aplicado al área de geociencias [Tesis de posgrado]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/459/3/TMIPICYTC3162016.pdf>
- Castillo, M. D. (2003). *Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo*. Universitat de Barcelona.
- Castro-Lazcarro, M., Davydova-Belitskaya, V., & Cárdenas-Tristán, A. (2021). Assessment of climate indices and NDWI analysis in Lerma Chapala basin. *Preprints*, 2021020067. <https://doi.org/10.20944/preprints202102.0067.v1>
- Chapala, L., Pátzcuaro, L., Cuitzeo, L., & López-Caloca, A. A. (2015). Inpainting restoration for inland waters Mexico ecosystems. *2015 8th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (Multi-Temp)*, Annecy, France. <https://doi.org/10.1109/Multi-Temp.2015.7245782>

- Colditz, R. R., Souza, C. T., Vazquez, B., Wickel, A. J., & Ressler, R. (2018). Analysis of optimal thresholds for identification of open water using MODIS-derived spectral indices for two coastal wetland systems in Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 70, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.03.008>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2018). *Estadísticas del agua en México 2018*. Conagua. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/publicaciones/eam2018.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019). *Más de 66 por ciento de México con algún grado de sequía*. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/mas-de-66-por-ciento-de-mexico-con-algun-grado-de-sequia>
- Danladi, I. B., Gül, M., & Ateş, E. (2020). Response of the barrier island coastal region of southwestern Nigeria to climate and non-climate forcing. *African Journal of Marine Science*, 42(1), 43-51. <https://doi.org/10.2989/1814232X.2020.1727953>
- Dávila, J., Díaz, R. E., Navarro, L. A., & Romeo, E. (2018). Las presas de jales en el noroeste del estado de Sonora: una aproximación geográfica mediante percepción remota. *Investigaciones Geográficas*, (97), 1-18. <https://doi.org/10.14350/rig.59624>
- Del-Toro-Guerrero, F. J., Daesslé, L. W., Méndez-Alonzo, R., & Kretschmar, T. (2022). Surface reflectance-derived spectral indices for drought detection: application to the Guadalupe Valley basin, Baja California, Mexico. *Land*, 11(6), 783. <https://doi.org/10.3390/land11060783>
- El-Asmar, H. M., Hereher, M. E., & El-Kafrawy, S. B. (2013). Surface area change detection of the Burullus Lagoon, North of the Nile Delta, Egypt, using water indices: a remote sensing approach. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(1), 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.04.004>
- Escobar-Flores, J. G., Torres, J., Valdez, R., Álvarez, S., Galina, P., & Sandoval, S. (2017). Detection of waterholes by Vegetation Index in the habitat of bighorn sheep (*Ovis Canadensis*) in Baja California. *PeerJ Preprints*, 5, e2999v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.2999v1>
- Escobar-Flores, J. G., Sandoval, S., Valdez, R., Shahriary, E., Torres, J., Alvarez-Cardenas, S., & Gallina-Tessaro, P. (2019). Waterhole detection using a vegetation index in desert bighorn sheep (*Ovis canadensis cremnobates*) habitat. *PLoS One*, 14(1), e0211202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211202>
- Fernández, J. D., Gallegos, C. A., Padilla, J. A., Barranco, A. I., Vázquez, J. A., & Correa, P. J. (2021). Detección automática de cuerpos de agua del bajo utilizando parámetros morfométricos obtenidos de imágenes satelitales y procesados con redes neuronales. *Pistas Educativas*, 43(140), 90-104. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2599/2032>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Fujihara, Y., Tanakamaru, H., Tada, A., Ahmed, B. M., & Eltaib, K. A. (2020). Analysis of cropping patterns in Sudan's Gash Spate Irrigation System using Landsat 8 images. *Journal of Arid Environments*, 173, 104044. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104044>
- Gómez-Palacios, D., Torres, M. A., & Reinoso, E. (2017). Flood mapping through principal component analysis of multitemporal satellite imagery considering the alteration of water spectral properties due to turbidity conditions. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 607-623. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1250115>
- Herndon, K., Muench, R., Cherrington, E., & Griffin, R. (2020). An assessment of surface water detection methods for water resource management in the Nigerien Sahel. *Sensors*, 20(2), 431. <https://doi.org/10.3390/s20020431>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Summary for Policymakers. En H. Lee & J. Romero (eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-34). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Jeppesen, E., Brucet, S., Naselli-Flores, L., Papastergiadou, E., Stefanidis, K., Noges, T., Noges, P., Attayde, J. L., Zohary, T., Coppens, J., Bucak, T., Fernandes, R., Sousa, F. R., Kernan, M., Søndergaard, M., & Beklioglu, M. (2015). Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia*, 750, 201-227. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>

- Jiang, H., Feng, M., Zhu, Y., Lu, N., Huang, J., & Xiao, T. (2014). An automated method for extracting rivers and lakes from landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(6), 5067-5089. <https://doi.org/10.3390/rs6065067>
- Jin, C., Xiao, X., Merbold, L., Arneth, A., Veenendaal, E., & Kutsch, W. L. (2013). Phenology and gross primary production of two dominant savanna woodland ecosystems in Southern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 135, 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.033>
- Kasampalis, D. A., Alexandridis, T. K., Deva, C., Challinor, A., Moshou, D., & Zalidis, G. (2018). Contribution of remote sensing on crop models: a review. *Journal of Imaging*, 4(4), 52. <https://doi.org/10.3390/jimaging4040052>
- Krinner, G., & Boike, J. (2010). A study of the large-scale climatic effects of a possible disappearance of high-latitude inland water surfaces during the 21st century. *Boreal Environment Research*, 15, 203-217. <https://epic.awi.de/id/eprint/20281/>
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Semarnat. <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2017/12/agua-y-clima.pdf>
- Leal, O. A., Gómez, M. A., Saldaña, M. P., & de la Maza, M. (2019). Tendencias de cambio en los humedales de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México. *Alter*, 20, 57-77. <https://static1.squarespace.com/static/552c00efe4b0cdec4ea42d9f/t/5f1a030c0bfb640dc274b3bc/1595540239064/5-ALTER20-tendencias2.pdf>
- Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., Sun, B., & Zhang, X. (2013). A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11), 5530-5549. <https://doi.org/10.3390/rs5115530>
- López, P. A., López, E., Martínez, J. A., & Puebla, J. H. (2019). Water bodies detection using supervised learning algorithms. *IEEE International Fall Meeting on Communications and Computing (ROC&C)*, Acapulco, México. <https://doi.org/10.1109/ROCC.2019.8873535>
- Luna, J. D. (2017). *Las presas de jales en la zona Noroeste del Estado de Sonora: una aproximación geográfica mediante Percepción Remota*. El Colegio de Sonora. <https://biblioteca.colson.edu.mx/e-docs/RED/RED001132.pdf>
- Magaña, V. O., & Neri, C. (2012). Cambio climático y sequías en México. *Ciencia-Academia Mexicana de Ciencias*, 63(4), 26-35. <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/cambio-climatico-y-sequias-en-mexico>
- Malahlela, O. E. (2016). Inland waterbody mapping: towards improving discrimination and extraction of inland surface water features. *International Journal of Remote Sensing*, 37(19), 4574-4589. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1217441>
- Maldonado, D. (2022). *Investigating changes in Mangrove cover and conservation policy in the protected area of Yum Balam, Mexico, 1981-2020*. Carleton University. <https://repository.library.carleton.ca/concern/etds/j9602172k>
- Martínez, 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>
- Masocha, M., Dube, T., Makore, M., Shekede, M. D., & Funani, J. (2018). Surface water bodies mapping in Zimbabwe using landsat 8 OLI multispectral imagery: a comparison of multiple water indices. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106, 63-67. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.005>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Menarguez, M. A. (2015). *Global water body mapping from 1984 to 2015 using global high resolution multispectral satellite imagery*. University of Oklahoma.
- Mozafari, M., Hosseini, Z., Fijani, E., Eskandari, R., Siahpoush, S., & Ghader, F. (2022). Effects of climate change and human activity on lake drying in Bakhtegan Basin, southwest Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 8(109). <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00707-z>

- Mullen, C., & Muller, M. F. (2020). Assessing historic water extents in rapidly changing lakes: a hybrid remote sensing classification approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-17. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-198>
- Murray, H., & Khaki, M. (2021). Analysis of Surface Water Areal changes using Remote Sensing Data. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 2(3), 019. <https://doi.org/10.21926/aeer.2103019>
- Nadeem, A. A., Zha, Y., Shi, L., Ali, S., Wang, X., Zafar, Z., Afzal, Z., & Tariq, M. A. U. R. (2023). Spatial downscaling and gap-filling of SMAP soil moisture to high resolution using MODIS surface variables and machine learning approaches over ShanDian river basin, China. *Remote Sensing*, 15(3), 812. <https://doi.org/10.3390/rs15030812>
- Ndehedehe, C. E., Ferreira, V. G., Onojeghuo, A. O., Agutu, N. O., Emengini, E., & Getirana, A. (2020). Influence of global climate on freshwater changes in Africa's largest endorheic basin using multi-scaled indicators. *Science of the Total Environment*, 737, 139643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139643>
- Noyola-Medrano, C., & Martínez-Sías, V. A. (2017). Assessing the progress of desertification of the southern edge of Chihuahuan Desert: a case study of San Luis Potosi Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 27(4), 420-438. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1385-5>
- Orimoloye, I. R., Ololade, O. O., Mazinyo, S. P., Kalumba, A. M., Ekundayo, O. Y., Busayo, E. T., Akinsanola, A. A., & Nel, W. (2019). Spatial assessment of drought severity in Cape Town area, South Africa. *Heliyon*, 5(7), e02148. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02148>
- Ortega, D., Cruz, J. D. L., & Castellano, H. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., Moher, D., Yepes-Nuñez, J. J., Urrútia, G., Romero-García, M., & Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Pech, F., Sánchez, J. V., & Sánchez, H. (2020). Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2. *Lámpsakos*, (24), 48-59. <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>
- Pricope, N. G., Mapes, K. L., & Woodward, K. D. (2019). Remote sensing of human-environment interactions in global change research: a review of advances, challenges and future directions. *Remote Sensing*, 11(23), 2783. <https://doi.org/10.3390/rs11232783>
- Rico, E., Chicote, A., González, M. E., & Montes, C. (1995). Batimetría y análisis morfométrico del lago de Arreo (N. España). *Limnetica*, 11(1), 55-58. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/13666/64234_L11a055_Batimetria_lago_Arreo.pdf?sequence=1
- Rojas-Villalobos, H. L. (2019). *A water informatics approach to exploring the hydrological systems of basins with limited information; the case of the Bustillos Lagoon, Chihuahua, Mexico* [Tesis doctoral]. New Mexico State University. <https://zenodo.org/records/4302787>
- Rojas-Villalobos, H., Samani, Z., Brown, C., Alatorre-Cejudo, L., Stringam, B., & Salas-Aguilar, V. (2022). Comparación de estimaciones de modelos de evaporación REEM y EEFlux en cuerpos de agua someros. Caso: laguna de Bustillos, Chihuahua, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(6), 209-248. <https://doi.org/10.24850/jtyca-13-06-05>
- Romero, F. S. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24, 13-41. <http://revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/212>
- Saiz-Rodríguez, J. A. (2020). *Evaluación de inundaciones e islas de calor urbano para la planificación de espacios verdes urbanos mediante teledetección, caso de estudio: Mexicali, Baja California* [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma de Baja California. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/entities/publication/78d9e234-bda6-4a00-89d6-5f543854e1ca>
- Sánchez, J. V., Pech-May, F., Sánchez, H. G., & Magaña-Govea, J. (2021). Mapeo de inundaciones utilizando imágenes satelitales SAR en Google Earth Engine. *Research in Computing Science*, 150(4), 83-95. https://rcs.cic.ipn.mx/2021_150_4/Mapeo%20de%20inundaciones%20utilizando%20imagenes%20satelitales%20SAR%20en%20Google%20Earth%20Engine.pdf

- Sánchez, G. C., Dalmau, O., Alarcón, T. E., Sierra, B., & Hernández, C. (2018). Selection and fusion of spectral indices to improve water body discrimination. *IEEE Access*, 6, 72952-72961. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881430>
- Sandoval, S., & Escobar-Flores, J. G. (2020). Changes in water surface area during the past 30 years in a Ramsar wetland in Durango, Mexico using Landsat data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5093-5095. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323537>
- Sandoval, S., Escobar-Flores, J. G., & Sánchez-Ortiz, E. (2020). Inventario de cuerpos de agua de la Sierra Madre Occidental (México) usando SIG y percepción remota. *Investigaciones Geográficas*, (102). <https://doi.org/10.14350/rig.59975>
- Sedeño-Díaz, J. E., & López-López, E. (2021). The influence of climate change on river corridors in drylands: the case of the Tehuacán-Cuicatlán biosphere reserve. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 681703. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.681703>
- Slagter, B., Tsendbazar, N. E., Vollrath, A., & Reiche, J. (2020). Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: a case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102009>
- Soria-Ruiz, J., Fernández-Ordoñez, Y. M., Ambrosio-Ambrosio, J. P., Escalona-Maurice, M. J., Medina-García, G., Sotelo-Ruiz, E. D., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2022). Flooded extent and depth analysis using optical and SAR remote sensing with machine learning algorithms. *Atmosphere*, 13(11), 1852. <https://doi.org/10.3390/atmos13111852>
- Tapia-Silva, F. O., & López-Caloca, A. A. (2018). Calculating long-term changes in Lake Chapala's area and water volume using remote sensing and field data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4), 042805. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.042805>
- Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2021). Assessment and analysis of morphometric characteristics of Lake Tana sub-basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *International Journal of River Basin Management*, 21(2), 1-15. <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1938091>
- Tulbure, M. G., Broich, M., Stehman, S. V., & Kommareddy, A. (2016). Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 178, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>
- Tottrup, C., Druce, D., Meyer, R. P., Christensen, M., Riffler, M., Dulleck, B., Rastner, P., Jupova K., Sokoup, T., Haag, A., Cordeiro, M. C. R., Martínez, J. M., Franke, J., Schwarz, M., Vanthof, V., Liu, S., Zhou, H., Marzi, D., Rudiyanto, R., Thompson, M., Hiestermann, J., Alemohammad, H., Masse, A., Sannier, C., Wangchuk, S., Schumann, G., Giustarini, L., Hallows, J., Markert K., & Paganini, M. (2022). Surface water dynamics from space: a round robin intercomparison of using optical and SAR high-resolution satellite observations for regional surface water detection. *Remote Sensing*, 14(10), 2410. <https://doi.org/10.3390/rs14102410>
- UNESCO-ONU-Agua. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. <https://es.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020>
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A., & Álvarez-Buylla, E. R. (2020). Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural Systems*, 177, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>
- Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135(11), 507-511. <https://doi.org/doi:10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*, 17(34), 35-71. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300002&lng=es&tlng=
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99-107. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
- Wang, Z., Liu, J., Li, J., & Zhang, D. D. (2018). Multi-spectral water index (MuWI): a native 10-m multi-spectral water index for accurate water mapping on Sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(10), 1643. <https://doi.org/10.3390/rs10101643>

- Wickel, B. (A. J.), Colditz, R., Ressler, R., Kucharski, J., & Salinas-Rodríguez, S. (2020). Monitoring Hydroperiod and Hydropatterns of coastal wetland systems in Mexico using Landsat time series. *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-12991. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12991>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yudha, I. S. (2023). Detection of changes in water surface area in Limboto Lake using landsat data from 1990 to 2020. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1127(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1127/1/012021>
- Yue, L., Li, B., Zhu, S., Yuan, Q., & Shen, H. (2023). A fully automatic and high-accuracy surface water mapping framework on Google Earth Engine using Landsat time-series. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 210-233. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2166606>
- Zamora-Rivas, D. (2019). Space-temporal study in the protected natural area of Xochimilco Lake with remote sensing in the period 1987-2016. In *Proceedings of the 1st International Conference on Geospatial Information Sciences*, 13, 62-69. <https://doi.org/10.29007/bfkp>