

**Evaluación de la contracción y expansión de cuerpos
hídricos lénticos bajo la influencia del fenómeno ENSO
(caso de estudio. Departamento de Córdoba, Colombia)**

**Evaluation of the contraction and expansion of lentic
water systems under the influence of the ENSO
phenomenon (case study. Department of Córdoba,
Colombia)**

Yulia Ivanova¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8836-5175>

Elsa Adriana Cárdenas², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8587-4625>

Camilo Andrés Celis-Lópera³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6000-1078>

Daniela Fernanda Vargas-Guerrero⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5307-0043>

¹Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia,
yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

²Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia,
elsa.cardenas@unimilitar.edu.co

³Independiente, Bogotá, Colombia, celis2106@gmail.com

⁴Independiente, Bogotá, Colombia,
ingdanielafemandavargas@gmail.com

Autora para correspondencia: Yulia Ivanova,
yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

Resumen

La sostenibilidad de los ecosistemas y de las actividades económicas dependen de manera significativa de la disponibilidad del agua, la cual puede ser afectada por su variabilidad temporal. Colombia es uno de los países que se caracteriza por una alta variabilidad temporal del recurso hídrico, producto de fenómenos globales, regionales y locales. Uno de los eventos macro climáticos que altera el régimen hídrico es el ENSO. Es altamente conocido su impacto sobre los cuerpos hídricos lóticos, mientras que las afectaciones de los sistemas lénticos son desconocidas. En el presente estudio se diseñó una metodología que integra los análisis climáticos con los estudios de teledetección para evaluar la relación entre la expansión y contracción de los cuerpos lóticos bajo el evento ENSO, que fue comprobada en cuatro ciénagas del departamento de Córdoba. Como resultado se obtuvo que las dinámicas en hasta el 60 % dependen de este evento macro climático. La metodología desarrollada puede considerarse como una herramienta para planeación ambiental territorial

de los alrededores de los sistemas lagunares, ya que permite estimar las zonas de amortiguación de estos.

Palabras clave: variabilidad hídrica, ENSO, índice NDWI, Colombia, ciénaga.

Abstract

The sustainability of ecosystems and economic activities depend significantly on the availability of water, which can be affected by its temporal variability. Colombia is one of the countries that suffers high temporal variability of the water resource because of global, regional, and local phenomena. One of the macro-climatic events that alter the water regime is ENSO. Its impact on lotic water bodies is well known, while the effects on lentic systems are unknown. In this study, a methodology, which integrates climatic analyses with remote sensing studies, was designed to evaluate the relationship between the expansion and contraction of lotic bodies under the ENSO event, verified in four wetlands (*ciénagas*) in the department of Córdoba. The results showed that the dynamics depend up to 60 % on this macro-climatic event. The methodology developed can be considered as a tool for environmental planning of the territory around the lagoon systems, since it allows estimating buffer zones.

Keywords: Water variability, ENSO, NDWI index, Colombia, swamp.

Recibido: 20/11/2019

Aceptado: 20/03/2021

Introducción

El sistema climático y sus dinámicas afectan a la mayoría de los ciclos naturales en la tierra. Entre todo el abanico de los eventos macro climáticos se ha demostrado la incidencia del fenómeno ENSO (El Niño-oscilación del sur) sobre la evolución de las coberturas vegetales (Bothale & Katpatal, 2014), diferentes ciclos bioquímicos (Nergui, Evans, & Chung, 2016), régimen de precipitaciones (Jin, Cai, & Tang, 2015) y temperaturas (Murgulet, Valeriu, Tissot, & Mestas-Nuñez, 2017) y, como consecuencia, sobre el balance hídrico terrestre (Ndehedehe, Awange, Kuhn, Agutu, & Fukuda, 2017), incluyendo las aguas subterráneas (Tremblay, Larocque, Anctil, & Rivard, 2011) y superficiales (Wang & Asefa, 2017).

Los estudios de afectación del régimen hídrico por el fenómeno ENSO se justifican porque la disponibilidad y variabilidad hídrica sustentan diferentes procesos vitales de ecosistemas (Acharya, Subedi, & Lee,

2018) y el desarrollo de la mayoría de las actividades productivas como sector agrícola (Okonkwo & Demoz, 2014), piscícola e hidro energético , entre otros.

En Colombia se estudia la incidencia del fenómeno ENSO sobre la variación de la oferta hídrica de cuerpos lóticos (Poveda, Álvarez, & Rueda, 2011) y los impactos que genera esta variación sobre diferentes sectores económicos .

No obstante, falta evaluar la existencia de teleconexiones entre el ENSO y la respuesta hidrológica de cuerpos lagunares, con el fin de reconocer dichas relaciones como una de las variables que sustenta la prestación de diferentes servicios ecosistémicos y la actividad económica de diferentes sectores productivos. El impacto del ENSO sobre los cuerpos hídricos lénticos se expresa a través de un conjunto de efectos, entre los cuales se pueden relacionar cambios en los niveles de lagos (Dulanya, Reed, & Trauth, 2013) y su temperatura (Mariano, Carolina, & Miranda-Leandro, 2018), así como la fluctuación de los límites del espejo del agua (Dulanya *et al.*, 2013). Según las últimas estadísticas nacionales (IDEAM, 2019), el 0.8 % del territorio nacional es ocupado por cuerpos lénticos, como lagunas, lagos, ciénagas, entre otros, que cumplen un importante papel en el balance de sistemas acuáticos y sostenimiento de los sistemas productivos. La mayor área de estos se encuentra en la cuenca Magdalena-Cauca que se caracteriza por complejos cenagosos de la depresión momposina.

Por esta razón se escogió una región del departamento de Córdoba para comprobar la influencia del fenómeno ENSO en sus fases fría y cálida sobre la expansión y contracción de los límites de los espejos de agua de cuatro sistemas cenagosos que disponen de la información del origen climático y geoespacial. Derivado de este análisis se conoce la incidencia del evento ENSO tanto en el régimen interanual de precipitaciones como en la aplicabilidad de la metodología desarrollada en los estudios de incidencia del evento ENSO sobre las dinámicas hídricas de cuerpos lénticos de zonas topográficamente planas del país.

La metodología diseñada integra los análisis climáticos con el uso del índice multispectral NDWI (Zhou, Zhao, Hao, & Wang, 2018); su aplicación al estudio de los cuerpos lénticos en el país puede complementar los resultados de los estudios del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) frente a la dependencia del régimen hídrico en el país del fenómeno ENSO.

Materiales y métodos

La zona del estudio está en el Departamento de Córdoba, y abarca los municipios de Lorica, Momil, Chima y Purísima. Se caracteriza por su

morfología aplanada, con pendientes menores del 3 %, lo cual, sumado a la variabilidad hídrica, genera problemáticas de inundaciones (Carvajal, 2009), que se amortiguan con las obras de drenaje utilizadas tanto para el manejo del régimen hídrico como para fines agrícolas y ganadería extensiva tecnificada. Las zonas cenagosas están hidráulicamente conectadas con el río Magdalena y las inundaciones se explican por la ocupación antrópica de las áreas destinadas a la regulación del régimen hídrico (Correa & Pereira, 2019). La mayoría de los cuerpos lagunares presentan procesos de sedimentación (Restrepo *et al.*, 2018), que generan una reducción significativa del hábitat de la ictiofauna, lo que lleva a facilitar la actividad pesquera por concentrarse la población de peces en áreas más profundas (Amador, 2016). Los usos extensivos del agua provocan su contaminación, lo que limita su uso para fines domésticos (Fernandez-Maestre, Johnson-Restrepo, & Olivero-Verbel, 2018). De todo lo mencionado, se concluye que en la zona del estudio, el desarrollo de las actividades económicas, así como el sostenimiento de diferentes procesos naturales dependen de la prestación de servicios ecosistémicos de provisión, regulación y soporte asociados con el agua (Rivillas-Ospina *et al.*, 2020).

Para evaluar si las dinámicas de contracción y expansión de los sistemas cenagosos dependen del fenómeno macro climático ENSO, se planteó una metodología adaptada para zonas con pendientes bajas, basada en la determinación de los cambios en el área de dichos cuerpos a partir de análisis climáticos y herramientas de teledetección.

Para aplicar la metodología diseñada se escogieron cuatro cuerpos hídricos lénticos que disponen de la información climatológica en el periodo de registro de las precipitaciones, representativo para hacer los estudios de teleconexiones (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruíz, 2021) y la de las imágenes de satélite del mismo periodo de observaciones de variables climáticas, para poder evaluar el efecto del fenómeno ENSO sobre las dinámicas hídricas. Además, se escogieron los sistemas hídricos que tuvieran un tamaño suficiente como para ser identificados a través de las imágenes satelitales Landsat.

En la Figura 1 se presenta el algoritmo de la metodología diseñada.

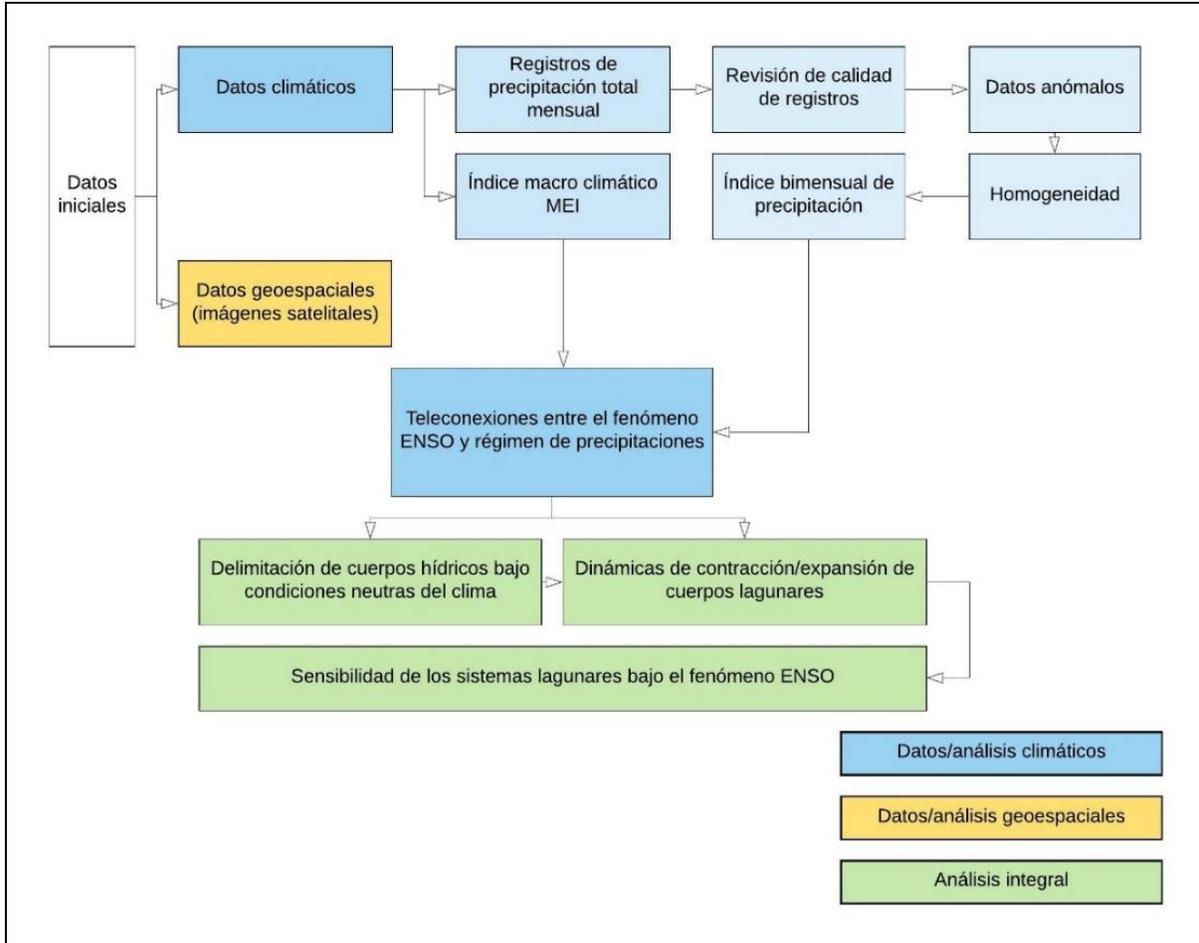


Figura 1. Algoritmo de la metodología diseñada para evaluar la incidencia del fenómeno ENSO sobre las dinámicas hídricas de cuerpos lénticos.

La primera etapa consistió en la preparación de la información base de carácter climático y geoespacial, que incluye la recopilación de ésta y revisión de su calidad. Dentro del conjunto de los datos hidroclimatológicos se encuentra el índice climático MEI (Poveda *et al.*,

2002) y las series mensuales de precipitaciones. En la Figura 2 se presenta la ubicación de las ocho estaciones medidoras de precipitaciones y su información general (Tabla 1). Todas las estaciones escogidas se consideran representativas para la zona del estudio según su radio de influencia recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011) para las estaciones ubicadas en la zona costera (53.6 km de radio de influencia y 9 000 km²).

Tabla 1. Información general de las estaciones climáticas en la zona.

Núm.	Código	Tipo	Nombre*
1	1307025	PM	El Trapiche
2	1308501	CP	La Doctrina
3	1307024	PM	Cerro Bahía
4	1307021	PM	Cotorra
5	1307043	PM	Venecia
6	1309023	PM	La Pastora
7	1307045	PM	Aguas Mohosas
8	1307044	PM	Villa Marcela
*PM: estaciones pluviométricas; CP: estación climática principal			

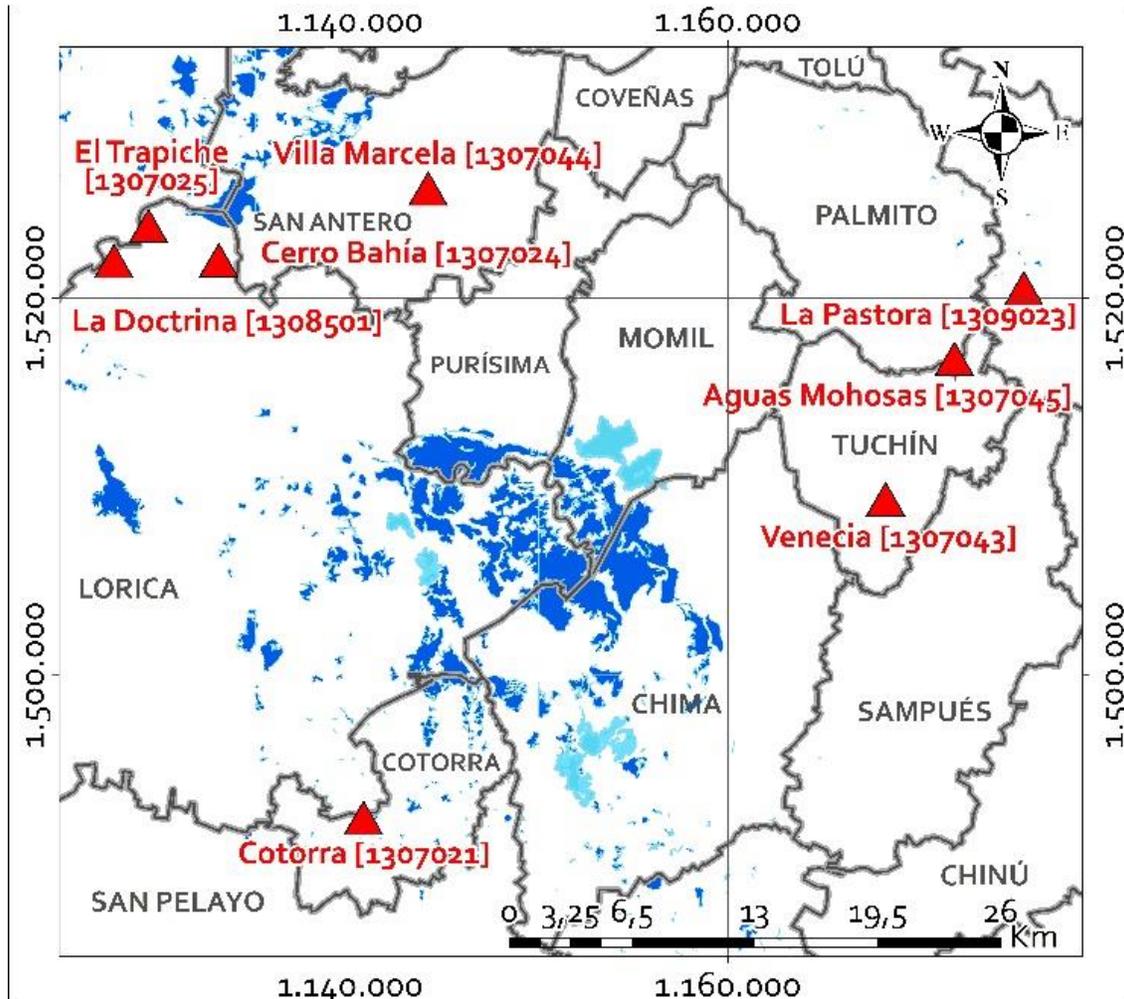


Figura 2. Localización de cuerpos hídricos y estaciones climáticas en la zona del estudio.

El paso previo a la investigación consistió en la revisión de la calidad de los registros de precipitaciones mensuales, asociada con el análisis de los datos atípicos, de homogeneidad y complementación de las series. Este procedimiento se utiliza para comprobar que la serie histórica tiene

suficientes valores para ser analizada. La identificación de los datos atípicos se revisó con el criterio de Grubb's (Ramírez, 2007). El análisis de homogeneidad de las series temporales se hace con el fin de revisar la estacionariedad y concluir si pertenecen al mismo conjunto estadístico (Castro & Carvajal-Escobar, 2010). Para tal fin se aplicaron las pruebas de Student y Fisher (Ramírez, 2007).

El análisis climático en la metodología requiere que los registros de precipitaciones no tengan vacíos de datos. Para ello, los datos ausentes de precipitaciones se completaron con base en los registros completos de precipitaciones a través del análisis de correlación múltiple siempre y cuando las series fueran estadísticamente correlacionadas.

Finalmente, los registros de precipitaciones se transformaron a los índices bimensuales de precipitaciones para participar en conjunto con el índice multivariado MEI en los estudios de teleconexiones que forman parte de la segunda etapa en la metodología.

Los análisis de teleconexiones se hacen para identificar en qué grado las precipitaciones mensuales dependen del evento climático y con qué periodo de retardo se manifiesta el fenómeno ENSO sobre el régimen de precipitaciones, pues la respuesta de climas regionales a los eventos macro climáticos no es inmediata y depende de un conjunto de factores orográficos y fisiográficos (Salas-Parra, Poveda-Jaramillo, & Mesa-Sánchez, 2020). Para este fin se aplicó el análisis de correlación lineal entre las series del índice multivariado MEI y las series de los índices bimensuales de precipitaciones. El mayor valor obtenido entre las

correlaciones construidas indica en cuántos meses la onda macro climática llega hasta la localización del proyecto (periodo de retardo) y en qué porcentaje define el régimen interanual de precipitaciones.

La tercera etapa consistió en la elaboración de la línea base correspondiente a la delimitación de los cuerpos hídricos bajo condiciones neutras del clima. Para este fin se eligieron los meses con el índice MEI mayores a -0.5 y menores a 0.5, se aplicó el periodo de retardo definido previamente y se procedió a descargar imágenes Landsat. Teniendo en cuenta que la fluctuación de los límites de cuerpos hídricos en condiciones neutras del clima depende de otros factores, diferentes del ENSO, se tuvo que contar con una muestra de imágenes estadísticamente válida que fue definida a través del criterio con el intervalo de confianza del 95 % (Corral, Corral, & Franco-Corral, 2015). En total se consultaron 28 imágenes en el periodo comprendido entre los años 1984 y 2017.

Al inicio fue necesario unificar el sistema de referencia de las imágenes descargadas del sistema geodésico mundial norte (WGS84) y fueron proyectadas al WGS84 sur, además de realizar un ajuste en el área de trabajo para obtener la escala 1:100 000.

Posteriormente se calculó el área de cada cuerpo hídrico a partir de una composición RGB con las bandas de las imágenes Landsat, que permitió contrastar las coberturas de tierra y agua (Franco, 2017) todo esto a una escala de 1:25 000. Esta digitalización se llevó a cabo por medio de una clasificación supervisada con base en las coberturas CORINE Land Cover, lo que sirvió para confirmar que los cuerpos de agua

formaban parte de la categoría de superficies de agua —aguas continentales— lagunas, lagos y ciénagas naturales (IDEAM, 2010).

Considerando que de acuerdo con la firma espectral del agua, la mayor reflectividad se produce en longitudes de onda de azul, disminuyendo hacia el infrarrojo cercano, se utilizó una composición RGB con las bandas infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo lejano (SWIR 1), y azul correspondiente a las bandas 5, 6, y 2 para las imágenes del satélite Landsat 8, y las bandas 4, 5 y 1 de los satélites Landsat 7 y 5. Esta combinación se utilizó para identificar cuerpos de agua en tonalidades azul oscuro a negro de acuerdo con su profundidad, contenido de materiales en suspensión y rugosidad de la superficie. Por otra parte, el suelo y las coberturas vegetales presentan mayor reflectividad en el infrarrojo, razón por la cual se identifican en la imagen en colores verde, café y naranja (Figura 3) (Chuvieco, 1995).

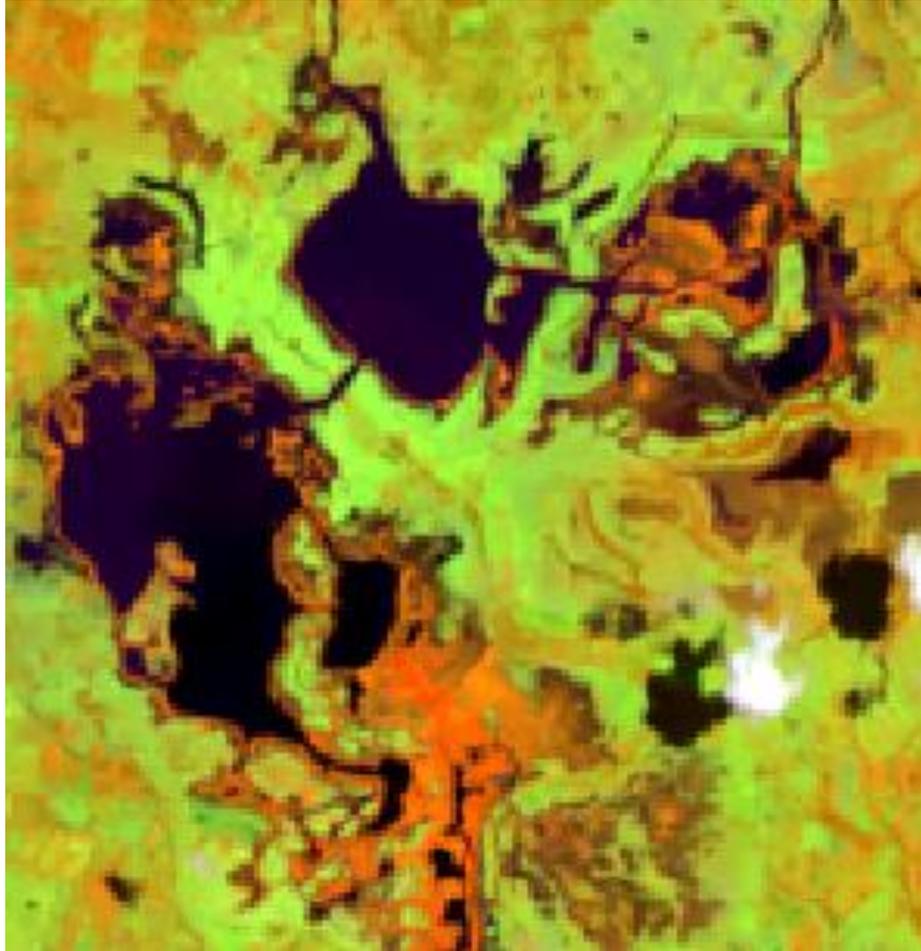


Figura 3. Composición RGB.

Las composiciones resultantes facilitaron la delimitación directa de estos cuerpos a través del índice NDWI (Índice Diferencial de Agua Normalizado), para lo cual fue necesario desarrollar la operación entre las bandas verde e infrarrojo cercano (NIR), Ecuación (1), donde las bandas 3 y 5 corresponden al satélite Landsat 8, y las bandas 2 y 4 a los satélites Landsat 7 y 5 (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{V - NIR}{V + NIR} \quad (1)$$

Este índice se usa sobre todo como una medida de la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que tiene el suelo (Martínez-Mena, 2017); tiene como característica que suprime la vegetación y realza los cuerpos de agua, lo que facilita la identificación de los mismos (Figura 4).

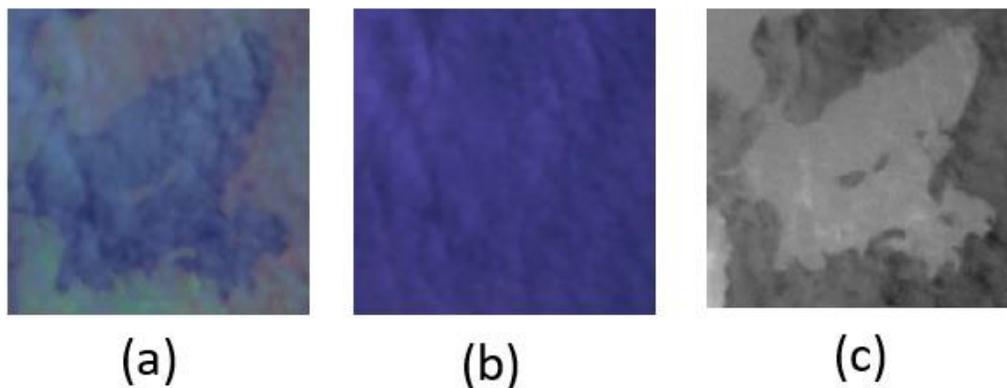


Figura 4. Composiciones Landsat: a) composición RGB; b) color natural; c) índice NDWI. Fuente: elaboración propia.

Así, para cada cuerpo hídrico se obtuvieron 28 valores de las áreas y se calculó el valor promedio que corresponde al área de cada uno bajo las condiciones neutras del clima. Para evaluar la exactitud en la definición

de las áreas se midió la diferencia entre las áreas de una de las imágenes Landsat (resolución espacial de 30 m) de la línea base y una imagen PlanetScope (resolución espacial de 3 m) con fechas cercanas. Esta segunda se digitalizó a una escala de 1:8 000. La diferencia en las áreas se expresó en términos relativos y sirvió tanto para obtener el error de la definición de las áreas como para ser el criterio si el cambio del área bajo en fenómeno ENSO es significativo, siendo así siempre cuando el porcentaje de expansión o contracción del área es mayor que el error del cálculo del área.

Con la línea base establecida se procedió al análisis de la zona en relación con el fenómeno macro climático ENSO, con el cual se observó la contracción y expansión de los cuerpos hídricos. Para esto se descargaron imágenes correspondientes a las fechas que registran distintas intensidades del fenómeno. Con un índice MEI superior a 0.5 e imágenes con fechas entre 1986 y 2016 para El Niño, y para La Niña un índice MEI inferior a -0.5 imágenes con fechas entre 1985 y 2013.

De igual manera que en el proceso anterior, para la cuarta etapa se repite el mismo procedimiento de teledetección para una muestra de 57 imágenes disponibles, integradas por imágenes Landsat, RapidEye y SPOT, con un total de 29 imágenes para el fenómeno de La Niña y 28 para El Niño.

Luego se digitalizaron las imágenes con base en el índice NDWI para así obtener el área de los cuerpos en las distintas fechas; al igual que para la línea base, las imágenes se digitalizaron a una escala 1:25.000.

Finalmente, se evaluó la contracción y expansión de los cuerpos hídricos bajo el fenómeno ENSO, entendida como cambio porcentual del área de los cuerpos hídricos *versus* valores del índice MEI tanto positivos como negativos. La relación entre estas dos variables permite comprender en qué medida la variación del espejo del agua de los cuerpos cenagosos responde a este evento macro climático.

Resultados

Como ya se había mencionado, en la zona de la localización de los cuerpos cenagosos se encuentran ocho estaciones climáticas, cuyos registros superan los 30 años, periodo recomendado en el contexto nacional para realizar los estudios climáticos. Ninguna de las series de precipitaciones mensuales tuvo valores atípicos según la prueba de Grubb's, mientras que el análisis de homogeneidad confirmó que las series son estacionarias por el valor promedio y en la mayoría de los casos no son estacionarias por la varianza. Lo último indica que los registros presentan un cambio en el patrón de variabilidad temporal que puede estar asociado con el efecto del cambio climático global que presenta un tema de estudio independiente.

Los resultados del análisis de teleconexiones —obtenidos a través del análisis correlativo lineal entre las series de precipitaciones y el índice MEI— indican que la señal macro climática del evento ENSO se manifiesta en el régimen de precipitaciones en un periodo de tres a cuatro meses. Este periodo corresponde al desfase temporal entre el índice MEI y la serie de precipitaciones, donde el coeficiente de correlación obtuvo el mayor valor.

Cabe resaltar que el coeficiente de correlación fluctuó cerca del valor de 0.3, lo cual indica que el régimen pluviográfico interanual en la zona en un 30 % depende del fenómeno ENSO y en un 70 % de otros factores físico-geográficos como paso de la zona de confluencia intertropical (ZCIT) (Pérez-Rendón, Ramírez-Builes, & Peña-Quiñones, 2016) del fenómeno de oscilación cuasi bienal (Lubis, Matthes, Omrani, Harnik, & Wahl, 2016) de la oscilación del Atlántico del norte (Poveda *et al.*, 2002), conexión con aguas subterráneas y efectos de actividades antrópicas, entre otros. Seis de ocho estaciones (75 % de las estaciones) confirmaron que la señal del fenómeno ENSO se refleja en series de precipitaciones con un retardo de cuatro meses, mientras que dos estaciones restantes —identificadas con los códigos 13070240 y 13070250— confirmaron un retardo de tres meses. Según el resultado de la mayoría de las estaciones, el periodo de cuatro meses se usó como tiempo de retardo de la influencia del fenómeno ENSO sobre las condiciones climáticas en la zona del estudio, y sirvió para escoger las fechas de las imágenes satelitales en condiciones neutras del clima, y bajo las fases fría y cálida del evento ENSO.

Como se había mencionado en la descripción metodológica, para conocer el cambio en el espejo del agua de los complejos cenagosos es necesario partir del conocimiento sobre el área de éstos sin influencia del evento macro climático ENSO (variación del índice MEI en el rango de ± 0.5). En la Tabla 2 se presentan los valores de las áreas de cada cuerpo hídrico como valor promedio de los resultados de interpretación de las 28 imágenes satelitales. En la misma tabla se encuentra el error relativo de cada área en forma porcentual calculado con base en las áreas según el índice NDWI de las imágenes Landsat y las áreas definidas según la teledetección a través de la imagen Planet Scope de fechas cercanas.

Tabla 2. Valores de las áreas de los cuerpos hídricos bajo condiciones neutras del clima con base de la composición RGB, índice NDWI y error relativo de las áreas definidas por el índice NDWI *versus* imagen PlanetScope.

Cuerpos hídricos	Área (km ²)		Error relativo (%)
	Medio de la composición RGB	NDWI	
Ciénaga El Caracolí	0.56	0.65	0.88
Charco el Baradero	0.48	0.45	0.05
Ciénaga Zapal	2.39	2.76	0.05
Ciénaga de Momil	3.21	3.48	0.08

Cuerpos hídricos	Área (km ²)		Error relativo (%)
	Medio de la composición RGB	NDWI	
Conjunto cenagoso	4.1	3.91	0.41

Como se puede ver de los resultados obtenidos, los valores de las áreas de los espejos del agua de los cuerpos hídricos en las condiciones neutras del clima son cercanos, definidos tanto por medio de la composición RGB como a través del índice NDWI. El error relativo entre las áreas (medio NDWI) de las imágenes Landsat y la imagen PlanetScope para todos los cuerpos cenagosos no supera el 0.88 %. Este valor indica que a partir del cambio del 0.88 %, tanto positivo como negativo, en las áreas de cuerpos cenagosos se consideran significativos para evaluar la respuesta hidrológica al evento ENSO.

Posteriormente se obtuvieron las áreas de los espejos del agua de los cuerpos hídricos bajo la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña de diferentes intensidades. En dicha interpretación, a través del uso del índice NDWI se utilizaron 57 imágenes. Estos valores, por su parte, se transformaron al cambio porcentual del área con relación al área del cuerpo hídrico bajo las condiciones neutras del clima y se construyeron versus los valores correspondientes del índice MEI. Cabe resaltar que en ninguno de los casos dichos cambios fueron menores que el error de definición de las áreas, lo que indica que todos los cambios obtenidos se pueden considerar como significativos.

En la Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9 se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica, que constan de la gráfica de sensibilidad de cuerpos hídricos por el evento ENSO y de los tres esquemas consecutivos, donde se pueden apreciar visualmente las dinámicas de contracción y expansión de los cuerpos cenagosos bajo los efectos del fenómeno ENSO de intensidades más altas registradas según las imágenes satelitales consultadas. Los valores de los coeficientes de correlación con sus respectivas ecuaciones de regresión se presentan en la Tabla 3. La significancia de los valores de los coeficientes de correlación se demostró a través del criterio de Fischer con el nivel de significancia del 5 %.

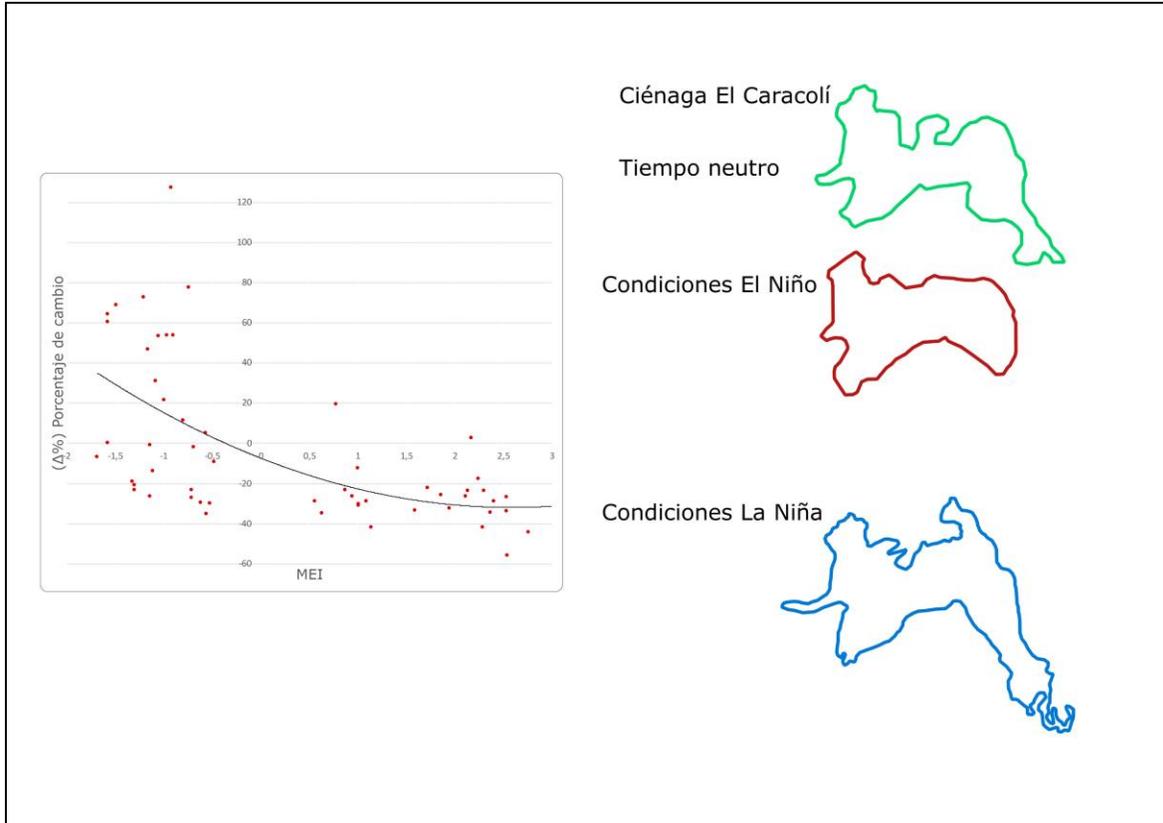


Figura 5. Gráfica de sensibilidad de ciénaga Caracolí por el evento ENSO, y los esquemas de las dinámicas de contracción y expansión de la ciénaga bajo los efectos del fenómeno ENSO de intensidades más altas registradas según las imágenes satelitales consultadas.

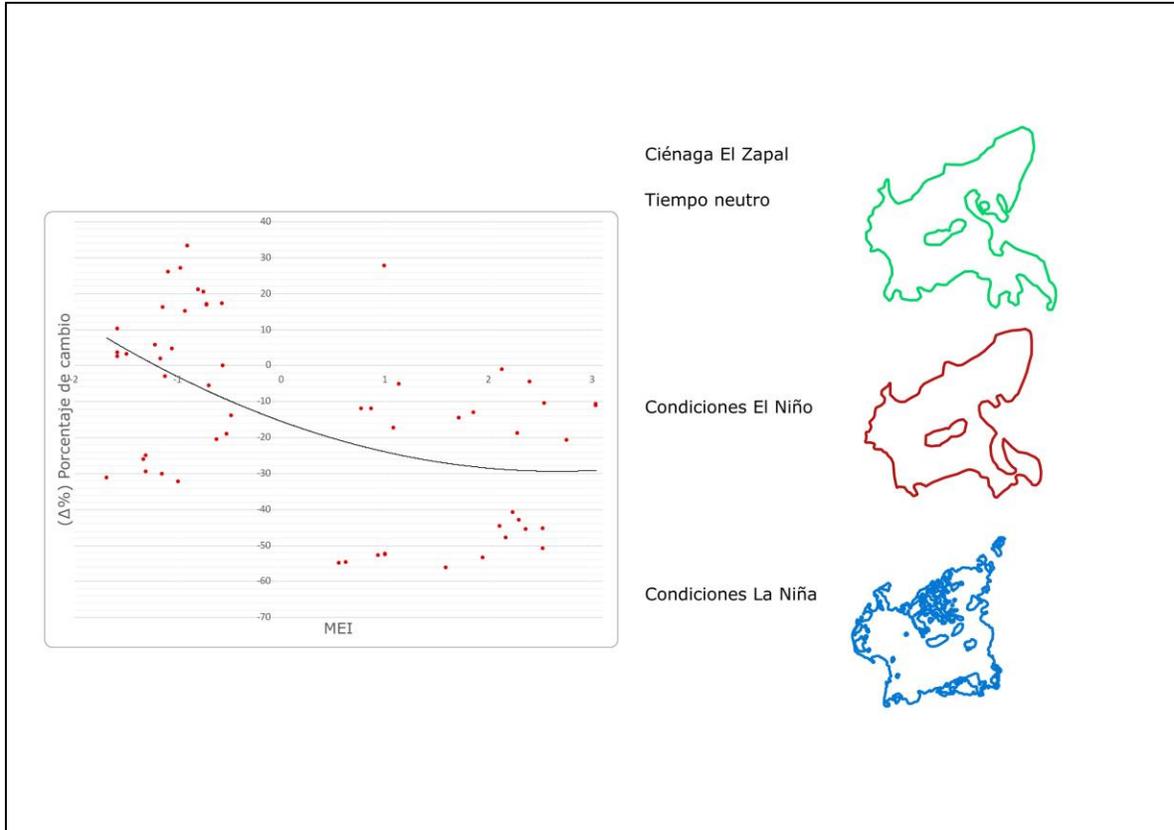


Figura 6. Gráfica de sensibilidad de la ciénaga El Zapal por el evento ENSO, y los esquemas de las dinámicas de contracción y expansión de la ciénaga bajo los efectos del fenómeno ENSO de intensidades más altas registradas según las imágenes satelitales consultadas.

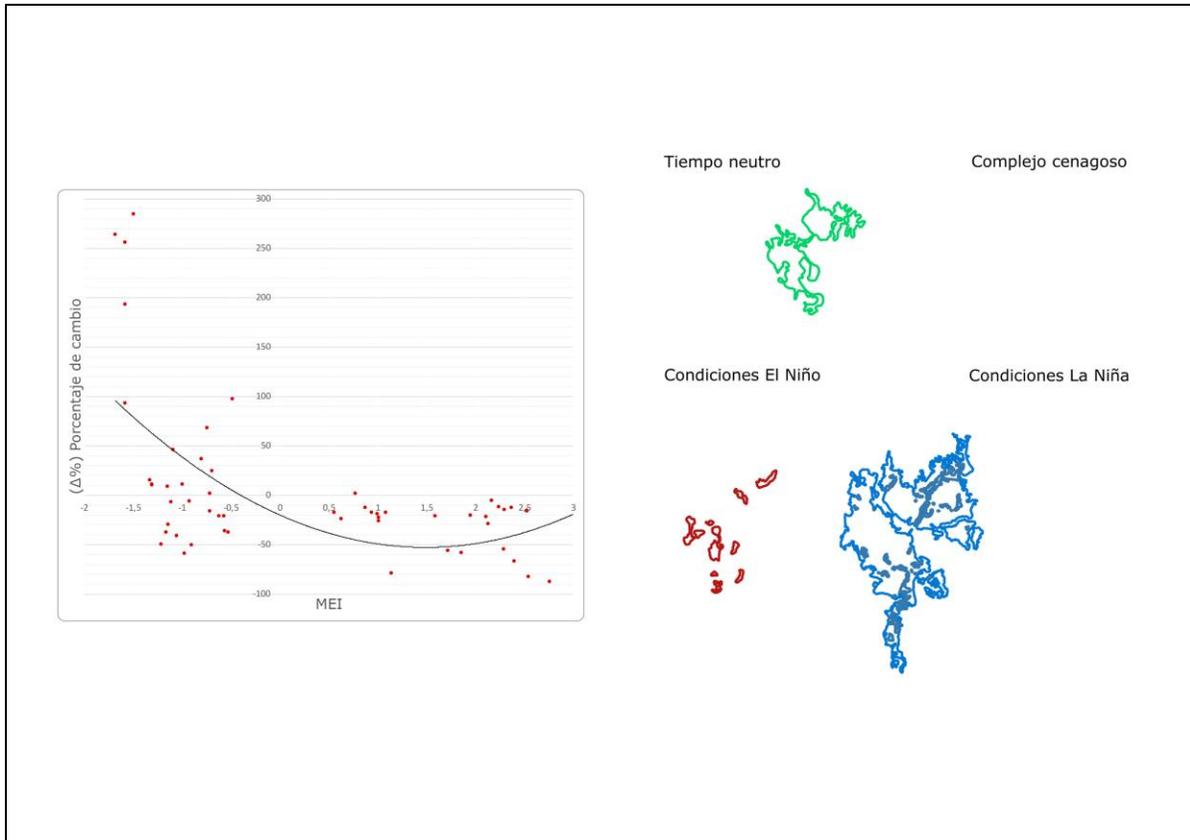


Figura 7. Gráfica de sensibilidad de cuerpos hídricos por el evento ENSO, y los esquemas de las dinámicas de contracción y expansión de los cuerpos cenagosos bajo los efectos del fenómeno ENSO de intensidades más altas registradas según las imágenes satelitales consultadas.

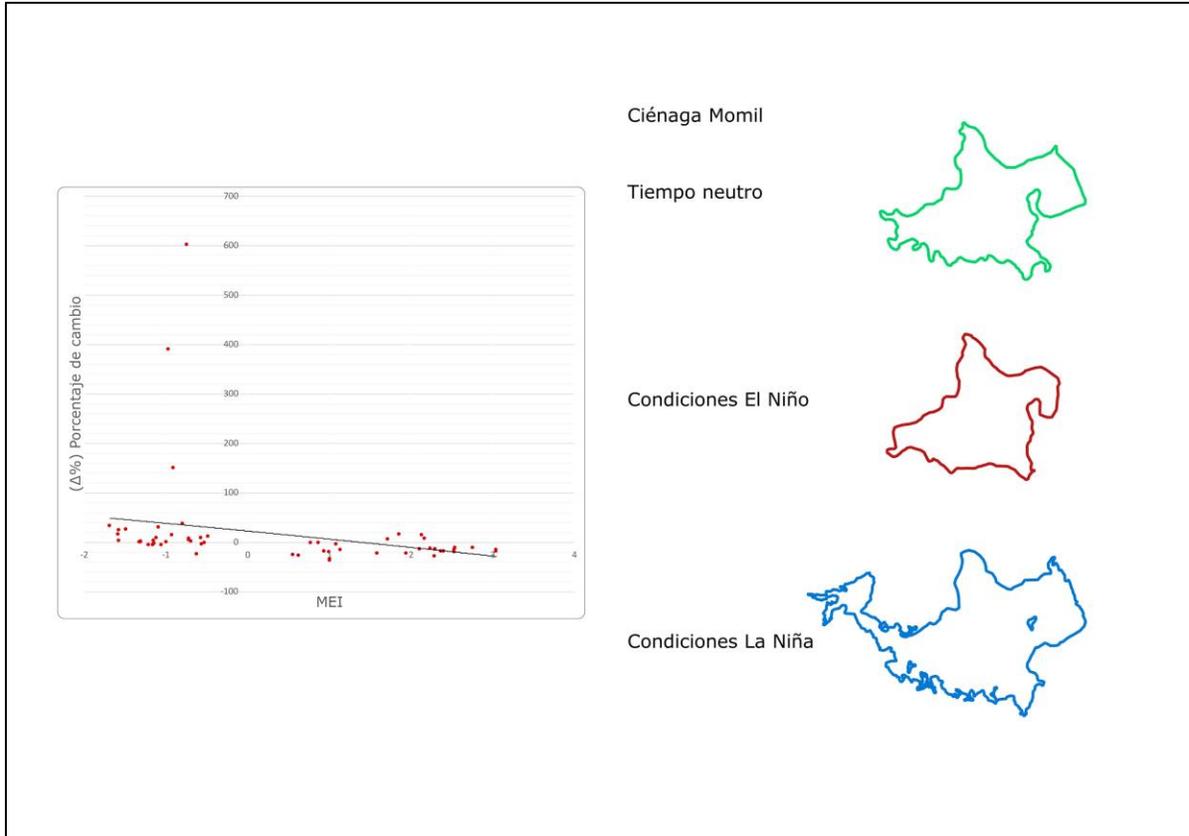


Figura 8. Gráfica de sensibilidad de la ciénaga de Momil por el evento ENSO, y los esquemas de las dinámicas de contracción y expansión de la ciénaga bajo los efectos del fenómeno ENSO de intensidades más altas registradas según las imágenes satelitales consultadas.

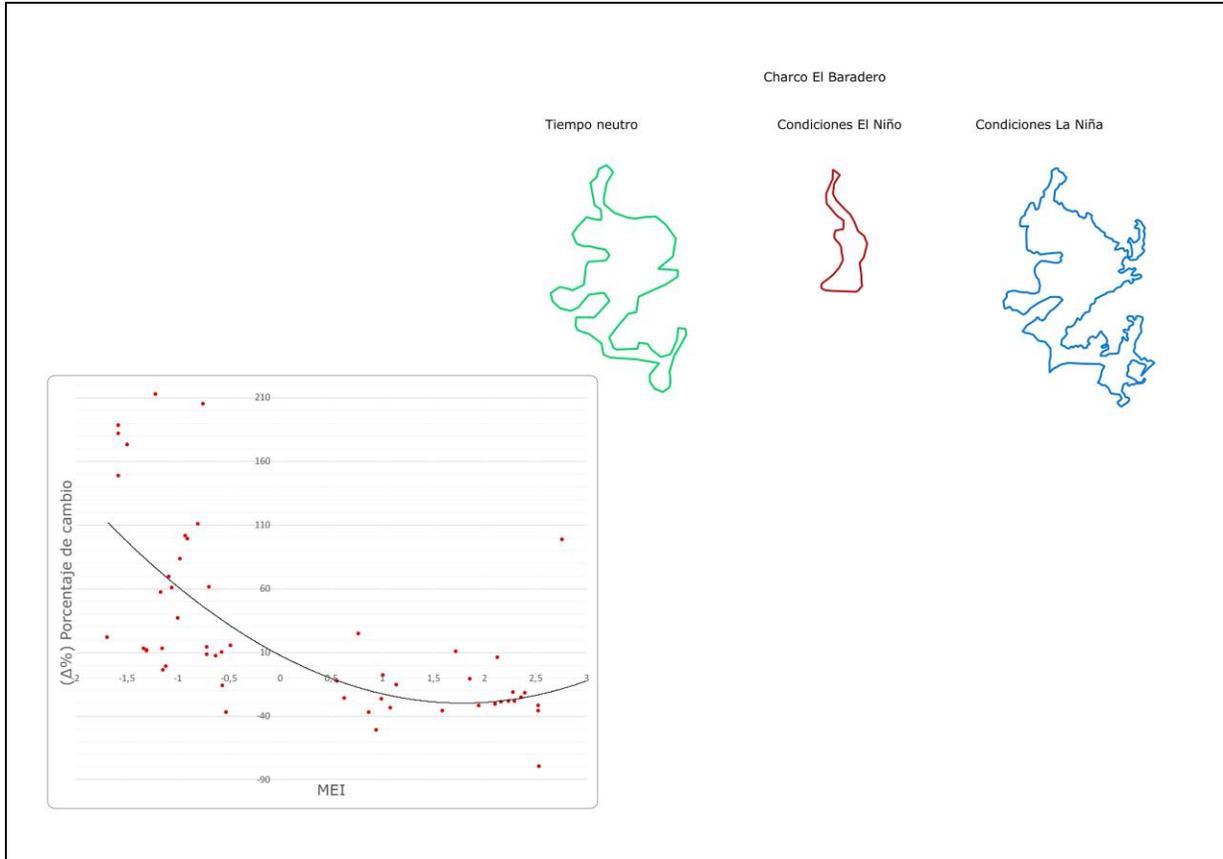


Figura 9. Gráfica de sensibilidad del charco el Baradero por el evento ENSO, y los esquemas de las dinámicas de contracción y expansión de los cuerpos cenagosos bajo los efectos del fenómeno ENSO de intensidades más altas registradas según las imágenes satelitales consultadas.

Tabla 3. Valores de los coeficientes de correlación de la respuesta de contracción y expansión de cuerpos hídricos *versus* el índice MEI.

Cuerpo léntico	Valor de cte. de correlación	Ecuación de regresión
Ciénaga El Caracolí	$R = 0.61$	$\Delta_{\%} = 3.672 \times MEI^2 - 18.965 \times MEI - 7.3706$
Ciénaga Zapal	$R = 0.51$	$\Delta_{\%} = 1.9612 \times MEI^2 - 10.445 \times MEI - 15.457$
Complejo cenagoso	$R = 0.61$	$\Delta_{\%} = 14.779 \times MEI^2 - 43.972 \times MEI - 20.301$
Ciénaga Momil	$R = 0.26$	$\Delta_{\%} = -0.2995 \times MEI^2 - 15.981 \times MEI + 22.392$
Charco el Baradero	$R = 0.68$	$\Delta_{\%} = 11.785 \times MEI^2 - 42.023 \times MEI + 7.7886$

Discusión

Los cuerpos cenagosos del departamento de Córdoba resultan ser sensibles ante el fenómeno ENSO y el régimen interanual hidrológico. Las

áreas de éstos cambian en un promedio de 32 % para el fenómeno de La Niña y en un 25.5 % para El Niño. En la zona de estudio, la presencia de la fase cálida del fenómeno ENSO (El Niño) se refleja en una disminución de precipitaciones y, por consiguiente, en la contracción de los cuerpos cenagosos; mientras que el fenómeno frío del ENSO (La Niña) se refleja en un incremento de precipitaciones y en una ampliación de los límites de los cuerpos hídricos.

El hecho de que los valores del coeficiente de correlación entre el ENSO y el porcentaje del cambio en las áreas de los cuerpos hídricos defieran de uno indica que existen otros factores climáticos forzantes que pueden influir al régimen interanual de los sistemas lagunares. Entre ellos, el paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), el fenómeno de la oscilación cuasi bienal y la del Atlántico del Norte. Asimismo, algunas características propias de sistemas lagunares modifican la respuesta hidrológica de cuerpos hídricos ante los eventos climáticos. Entre estas características se pueden mencionar la conectividad hidráulica de los sistemas lagunares que sirve como elemento regulador de la escorrentía superficial; los canales de irrigación y la represa Urrá, localizada aguas debajo de la zona del estudio, que modifican el régimen hídrico natural; conexión con aguas subterránea; proceso de evaporación desde la superficie del agua que depende directamente del área del espejo del agua y del régimen de temperaturas, entre otros.

Como consecuencia de esta compleja interacción entre diferentes variables, la mayoría de las relaciones construidas entre el fenómeno ENSO, y las dinámicas de contracción y expansión de los cuerpos hídricos

no son lineales (casos de la ciénaga Caracolí, complejo cenagoso y el charco Baradero), y donde el coeficiente de correlación entre el índice MEI y el cambio porcentual de las áreas de los cuerpos cenagosos varía en un rango de 0.61 a 0.68. Ello indica que las fluctuaciones de estos complejos cenagosos dependen de 61 a 68 % de las fases positivas o negativas del evento ENSO. La relación no lineal indica que a un cambio en el valor del índice MEI corresponderá un cambio cuadrático, no proporcional, en las fluctuaciones de contracción y expansión de los sistemas lagunares.

Otros dos cuerpos hídricos (ciénagas Momil y Zapal) presentaron correlaciones lineales con el índice MEI de 0.26 a 0.51, respectivamente. En la Figura 6 y Figura 8 se presentan unos puntos que se alejan significativamente de los demás datos, indicando que en algunas épocas aparecen algunos factores que tendrán un peso más significativo que el del ENSO en las dinámicas de contracción y expansión hídricas. A pesar de que estos puntos se pueden considerar como anómalos estadísticamente, se consideró no eliminarlos, porque la variabilidad hidrológica interanual se debe a un abanico de los factores diferentes del ENSO que interfieren a la correlación entre las dinámicas hídricas y el fenómeno macro climático estudiado. Más bien, los resultados demuestran la complejidad y no linealidad de las interrelaciones de los procesos naturales y antrópicos en la zona del estudio.

Los sistemas lagunares pueden cambiar su área en más del 80 % en las intensidades más altas (superiores al 1.5 del valor del índice MEI) del fenómeno de La Niña y en cerca del 26 % para el fenómeno de El Niño. Los porcentajes presentados indican que un cuerpo hídrico puede

presentar una fluctuación muy importante en su tamaño lineal, cumpliendo la función ecológica de la regulación de la escorrentía superficial y de otros ciclos naturales, pero también condicionando las actividades humanas que dependen de la disponibilidad del agua en los sistemas lagunares.

Para definir la línea base de los cuerpos hídricos se utilizaron 28 imágenes de satélite en las fechas con el índice MEI que indica la ausencia del evento ENSO. Se obtuvo que la diferencia porcentual entre las áreas en todos los casos no supera un 9 %, en comparación con su valor promedio. Este hecho demuestra la importancia de la influencia del evento ENSO en las dinámicas de contracción y expansión de los sistemas hídricos de la depresión momposina colombiana.

Los resultados de expansión y contracción de los cuerpos cenagosos obtenidos en el presente estudio dan orientaciones frente a los elementos que deben ser tomados en cuenta para definir las zonas de amortiguación hídrica y conservación que sustentan función ecológica (Smith *et al.*, 2010) y ambiental (Salazar, 2008), previniendo los procesos de salinización de tierras por intervención humana presentes en la zona (Restrepo *et al.*, 2018), y logrando equilibrio ecosistémico. Asimismo, permiten evaluar zonas de conflicto entre las actividades humanas y la función ecológica de los sistemas cenagosos en regular la escorrentía superficial del río Magdalena (Jaramillo *et al.*, 2018).

Teniendo en cuenta que la metodología desarrollada permite evaluar la contracción y expansión de los espejos del agua de sistemas

cenagosos bajo el fenómeno ENSO, que en cerca del 60 % define la variabilidad interanual hidrológica de sistemas cenagosos, puede servir de instrumento para la zonificación ambiental (Tengberg, Gustafsson, Samuelson, & Weyler, 2021) del territorio bajo variables hidrológicas que sirve para los proyectos de ordenamiento territorial de las regiones donde las actividades socioeconómicas se sustentan en la disponibilidad y variabilidad de los sistemas hídricos lénticos. Se propone que el agua se considere como el eje transversal de sostenibilidad ambiental y del desarrollo económico, articulando temas de seguridad alimentaria, acción climática, y conservación y restauración de servicios ecosistémicos, así como consumo y producción sostenible de los productos derivados del uso del recurso hídrico. Esta gestión sostenible del agua se logra no solo integrando la parte técnica del monitoreo a través de las herramientas de teledetección (Vargas, Willemen, & Hein, 2019), sino a través de unos modelos de gestión sostenible del agua multiparámetro que incluyen diferentes variables de origen ambiental, tecnológico, político y participación ciudadana (Cansino-Loeza & Ponce-Ortega, 2021). En tal orden de ideas, este estudio aporta a la dimensión técnica en los proyectos de gestión del recurso hídrico.

La metodología se desarrolló para las zonas con pendientes planas, donde el efecto de los sistemas cenagosos al fenómeno ENSO se refleja en los cambios de sus áreas y debe ser corroborada en otras zonas del país con características topográficas similares (p. ej., la región de Orinoquía) (Hamilton, Sippel, & Melack, 2004). Dichos estudios podrían dar respuesta a la incertidumbre que se tiene actualmente en Colombia

frente al efecto que produce el fenómeno ENSO a los sistemas hídricos lénticos, porque el impacto de dicho fenómeno sobre cuerpos hídricos lóticos es ampliamente conocido.

Siguiendo la lógica de investigación, existe la necesidad de desarrollar una metodología capaz de evaluar la sensibilidad de cuerpos hídricos lénticos ubicados en las zonas topográficamente complejas al fenómeno ENSO, porque su impacto debe ser reflejado en el cambio de profundidad del agua y es donde la integración de estudios climáticos y las herramientas de teledetección juegan un papel fundamental (Condom *et al.*, 2020).

El presente estudio demostró que la integración de los estudios climáticos con las herramientas de teledetección posibilita conocer relaciones entre los eventos climáticos y las dinámicas hídricas de cuerpos lénticos que hasta el momento no han sido conocidas, e integrar estos resultados a los modelos de planeación ambiental del territorio.

Conclusiones

De los resultados obtenidos se pueden realizar siguientes conclusiones:

- Las dinámicas de contracción y expansión de cuerpos hídricos responden al fenómeno ENSO.
- Existe un patrón en la respuesta cuando a la fase cálida del evento corresponde la contracción y a la fase fría la expansión del límite hidrográfico. En promedio, en los episodios fríos del evento (La Niña), los cuerpos hídricos expanden su tamaño lineal en un 32 %; mientras que en los episodios cálidos del ENSO (El Niño), los cuerpos se contraen en un 25.5 %.
- En algunos episodios del evento de La Niña de gran intensidad (el valor del índice MEI está por debajo de -1.5), el límite del charco el Baradero y del complejo cenagoso se expande en más del 80 %, demostrando una alta sensibilidad del régimen hídrico a este fenómeno climático.
- La respuesta al fenómeno de El Niño es más amortiguada y a la manifestación del evento con los valores del índice MEI encima del valor de 1.5 corresponde el valor máximo de expansión del área del 56 % de la ciénaga el Zapal. Los demás cuerpos hídricos analizados disminuyen su área en un 26 % en promedio.
- En los periodos neutros del fenómeno ENSO, la variación de los espejos del agua no supera más del 9 %, lo cual indica la importancia del evento macro climático en las dinámicas hídricas en la zona del estudio.
- Las salidas gráficas del análisis correlativo entre la contracción y expansión de cuerpos hídricos indican que hay otros factores que inciden y condicionan las dinámicas hídricas, y que deben ser objeto de un estudio independiente.

- Se demostró que la metodología desarrollada puede ser aplicada para los estudios de contracción y expansión de cuerpos cenagosos bajo el efecto del fenómeno ENSO en zonas topográficamente planas, donde la respuesta de los sistemas lagunares al evento macro climático se refleja en el cambio de las áreas de los espejos del agua.
- El estudio realizado demostró que en la región se presenta un conflicto ambiental por la ocupación antrópica de la zona de amortiguación de aguas altas del río Magdalena por los sistemas cenagosos, produciendo un desmejoramiento de la calidad de aguas y proceso de salinización, así como la afectación de los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica.

Agradecimientos

Los autores agradecen la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por financiar la investigación bajo el número del Proyecto ING-INV-2625.

Referencias

- Acharya, T., Subedi, A., & Lee, D. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*, 18(8), 2580. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/s18082580>
- Amador, J. (2016). *La Ciénaga Grande y los complejos lagunares*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga.

- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruíz, J. F. (5 de marzo, 2021). *Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur (ENSO)*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatica+Trimestral+Precipitacion+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/eec9752d-05ac-43f5-913c-4a3c7adc7860>
- Bothale, R. V., & Katpatal, Y. B. (2014). Response of rainfall and vegetation to ENSO events during 2001-2011 in Upper Wardha watershed, Maharashtra, India. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 583-592. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000825](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000825)
- Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Sustainable assessment of water-energy-food nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125-194. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.125194
- Carvajal A. (2009). Caracterización físico-biótica del Litoral del departamento de Córdoba. Cartagena de Indias, Colombia: Dirección General de Marítima (DIMAR)-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrológicas.
- Castro, L., & Carvajal-Escobar, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería en Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 15-25.

- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España: Ediciones Rialp, S.A.
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., ... & Villacis, M. (2020). Climatological and hydrological observations for the South American Andes: In situ stations, satellite, and reanalysis data sets. *Frontiers in Earth Science*, 8(92), DOI: 10.3389/feart.2020.00092
- Corral, Y., Corral, I., & Franco-Corral, A. (2015). Procedimientos de Muestreo. *Revista Ciencias de la Educación*, (46), 151-167.
- Correa, I. D., & Pereira, C. I. (2019). The historical, geomorphological evolution of the Colombian littoral zones (Eighteenth Century to Present). In: *Frontiers in Earth Sciences* (pp. 957-981). Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad EAFIT.
- Dulanya, Z., Reed, J. M., & Trauth, M. H. (2013). Mapping changing shorelines in the Malombe and Chiuta lakes of Malawi - environmental effects of recent climatic variations. *Catana*, 104, 111-119. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.016>
- Fernandez-Maestre, R., Johnson-Restrepo, B., & Olivero-Verbel, J. (2018). Heavy metals in sediments and fish in the Caribbean Coasts of Colombia: Assessing the environmental risk. *International Journal of environmental research*, 12, 289-301. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0091-1>

- Franco, R. (2017). *Composiciones Landsat en ARCGIS. Guía Básica*. Bogotá, Colombia: MIXDYR.
- Hamilton, S. K., Sippel, S. J., & Melack, J. M. (2004). Seasonal inundation patterns in two large savanna floodplains of South America: The llanos de Moxos (Bolivia) and the Llanos del Orinoco (Venezuela and Colombia). *Hydrological Processes*, 11(18), 2103-2116. DOI: 10.1002/hyp.5559
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá, DC, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá, DC, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Jaramillo, F., Brown, I., Castellazzi, P., Espinosa, L., Guittard, A., Hong, S.-H., ..., & Wdowincki, S. (2018). Assessment of hydrologic connectivity in an ungauged wetland with InSAR. *Environmental Research Letters*, 13(2), 024003.
- Jin, D., Cai, J., & Tang, W. (2015). Interannual variations of regional summer precipitation in mainland China and their possible relationships with different teleconnections in the past five decades. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 92(2), 265-283. Recuperado de <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-015>

- Lubis, S. W., Matthes, K., Omrani, N.-E., Harnik, N., & Wahl, S. (2016). Influence of the quasi-biennial oscillation and sea surface temperature variability on downward wave coupling in the northern hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(5), 1943-1965. Recuperado de <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0072.1>
- Mariano, E., Carolina, V., & Miranda-Leandro, A. (2018). Influences of ENSO and PDO phenomena on the local climate variability can drive extreme temperature and dot condition in a Pampean shallow lake affecting fish communities. *Environmental Biology of Fishes*, 101(4), 1-14.
- Martínez-Mena, M. G. (2017). Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos basados en el Índice Espectral de Sequía. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos.
- 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.
- Murgulet, D., Valeriu, M., Tissot, P., & Mestas-Nuñez, A. M. (2017). Relationships between sea surface temperature anomalies in the Pacific and Atlantic Oceans and South Texas precipitation and streamflow variability. *Journal of Hydrology*, (550), 726-739. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.05.041
- Ndehedehe, C. E., Awange, J. L., Kuhn, M., Agutu, N. O., & Fukuda, Y. (2017). Climate teleconnections influence on West Africa's

- terrestrial water storage. *Hydrological Processes*, 18(31), 3206-3224. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/hyp.11237>
- Nergui, T., Evans, R. D., & Chung, S. H. (2016). Relationships between the El Niño-Southern Oscillation, precipitation, and nitrogen wet deposition rates in the contiguous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(11), 1712-1724. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/2016GB005439>
- Okonkwo, C., & Demoz, B. (2014). The relationship between El Niño Southern Oscillations and cereal production in Sahel. *Environmental Hazards*, 13(4), 343-357. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/17477891.2014.940826>
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas N168*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Pérez-Rendón, E. P., Ramírez-Builes, V. H., & Peña-Quiñones, A. J. (2016). Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera. *Investigaciones Geográficas*, (89), 23-40. Recuperado de <https://doi.org/10.14350/rig.38707>
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, O. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2233-2249. DOI: 10.1007/s00382-010-0931-y

- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, Ó., Hoyos, C., Mejía, F., Barco, O., & Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, (6), 121-130.
- Ramírez, A. (2007). *Manual de estadística aplicado a las ciencias de la educación*. Bogotá, DC, Colombia: Javegraf.
- Restrepo, J. C., Shorokkte, K., Traini, C., Barholomae, A., Ospino, S., Ortiz, J. C., ..., & Orejarena, A. (2018). Estuarine and sediment dynamics in a microtidal tropical estuary of high fluvial discharge: Magdalena River (Colombia, South America). *Marine Geology*, 398, 86-98. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.12.008>
- Rivillas-Ospina, G., Maza-Chamorro, M. A., Restrepo, S., Lithgow, D., Silva, R., Sisa, A., ..., & Rudas, D. (2020). Alternatives for recovering the ecosystem services and resilience of the Salamanca Island Natural Park, Colombia. *Water (Switzerland)*, 15(2), 1513. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w12051513>
- Salas-Parra, H. D., Poveda-Jaramillo, G., & Mesa-Sánchez, Ó. (2020). Generalized synchronization between ENSO and hydrological variables in Colombia: A recurrence quantification approach. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 6(3), 1-15. DOI: 10.3389/fams.2020.00003

- Salazar, I. (2008). *Documentos de trabajo sobre economía regional: la economía de la Ciénaga Grande del Bajo Sinú: lugar encantado de las aguas*. Cartagena, Colombia: Banco de la República.
- Smith, M. W., Herfort, L., Tyrol, K., Suciu, D., Campbell, V., Crump, B. C., ..., & Baptista, A. M. (2010). Seasonal changes in bacterial and archaeal gene expression patterns across salinity gradients in the Columbia River coastal margin. *PLoS ONE*, 5(10), e13312. Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013312>
- Tengberg, A., Gustafsson, M., Samuelson, L., & Weyler, E. (2021). Knowledge production for resilient landscapes: Experiences from multi-stakeholder dialogues on water, food, forest, and landscapes. *Forest*, 12(1), 1-17. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/f12010001>
- Tremblay, L., Larocque, M., Anctil, F., & Rivard, C. (2011). Teleconnections and interannual variability in Canadian groundwater levels. *Journal of Hydrology*, 410(3-4), 178-188. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.013>
- Vargas, L., Willemen, L., & Hein, L. (2019). Assessing the capacity of ecosystems to supply ecosystem services using remote sensing and an ecosystem accounting approach. *Environmental Management*, 63(1), 1-16. Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013312>
- Wang, H., & Asefa, T. (2017). Impact of different type of ENSO conditions in seasonal precipitation and streamflow in the Southeastern United

States. *International Journal of Climatology*, 38(3). DOI:
10.1002/joc.5257

Zhou, Y., Zhao, H., Hao, H., & Wang, C. (2018). A new multi-spectral threshold normalized difference water index (MST-NDWI) water extraction method - A case study in Yanhe watershed. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences*, 42(3), 2557-2563. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-2557-2018