

PATRONES DE SEQUÍA EN LA CUENCA RÍO TIGRE, TAMAULIPAS

Alexia de Leija-Villafuerte¹, Jorge Alán Salinas-Jasso^{1*}, Fernando Velasco-Tapia¹
& Juan Alonso Ramírez-Fernández¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Ex Hacienda de Guadalupe, C.P. 67700, Linares, México

* jorge.salinasjs@uanl.edu.mx

Resumen

El noreste de México es afectado frecuentemente por eventos de sequía que, combinados con la sobreexplotación de agua para consumo humano, han ocasionado un incremento del estrés hídrico. Este trabajo presenta un análisis geoespacial de las condiciones hidrológicas en la cuenca Río Tigre en el municipio de Aldama, Tamaulipas, y su relación con eventos de sequía que han afectado la zona. Se presentan diferentes escenarios hidrológicos para el periodo 2004 – 2016 derivados del análisis de series climatológicas de precipitación, temperatura y evaporación. El estudio permitió estimar el comportamiento hidrológico superficial en la cuenca y el impacto asociado a eventos de sequía relacionados con el fenómeno El Niño Oscilación Sur.

Palabras clave

Análisis hidrológico; sequía; El Niño Oscilación Sur; cuenca Río Tigre, noreste de México

Abstract

Northeastern Mexico is frequently affected by drought events that, combined with the overexploitation of water to human supply, have increased water stress conditions. This work presents a geospatial analysis of the hydrological situation in the Tigre River basin in Aldama, Tamaulipas, and its relationship with different drought stages that have affected the region. Several scenarios are presented for the period 2004 – 2016, derived from the analysis of climatological series that include precipitation, temperature, and evaporation data. This evaluation made it possible to assess surface hydrological behavior in the basin and their relationship with the occurrence of drought phenomena linked to the El Niño Southern Oscillation.

Keywords

Hydrological analysis; drought; El Niño Southern Oscillation; Tigre River basin, northeastern Mexico

Introducción

La disponibilidad de agua dulce es primordial para el desarrollo óptimo de las funciones vitales del ser humano. Es

claro que la necesidad por cubrir la demanda hídrica de la población seguirá aumentando debido al incesante crecimiento demográfico y de las actividades relacionadas al bienestar humano, como son la agricultura, industria, ganadería, minería,

de Leija-Villafuerte, A., Salinas-Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Ramírez-Fernández, J.A. (2023): Patrones de sequía en la cuenca Río Tigre, Tamaulipas. – en: Montalvo Arrieta, J.C., Ramírez Fernández, J.A., Aguilar-Madera, C.G., Jenchen, U., Salinas Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (eds.): Número especial en conmemoración del 90° Aniversario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del 40° Aniversario de la Facultad de Ciencias de la Tierra. – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, **9 (2023)**: 15-23.

entre otras (Ahmed et al., 2021). Se estima que para el 2050 cerca de seis mil millones de personas sufrirán por la escasez de agua potable y problemas de abastecimiento como resultado del incremento en la demanda, reducción de recursos hídricos, el aumento de los procesos de contaminación y los efectos del cambio climático (Gosling & Arnell, 2016; Chiang et al., 2021).

Un factor importante en la evolución de las condiciones hidrológicas de un región es el marco climatológico. El fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) constituye el fenómeno climático más importante a nivel global (Latif & Keenlyside, 2009). ENOS se desarrolla por variaciones interanuales en las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico Ecuatorial, afectando las condiciones de presión en la troposfera inferior, alterando la circulación de Walker y controlando el transporte de humedad, distribución de precipitación en el planeta y el desarrollo de severas sequías (Díaz et al., 2001; Larkin & Harrison, 2005; Paeth et al., 2008; Abiy et al., 2019). Durante el desarrollo del fenómeno ENOS se presenta una alternancia de dos fases principales: una fase cálida definida como El Niño y una fase fría definida como La Niña, aunque en algunas condiciones se puede presentar una etapa transicional (fase neutral).

La sequía es uno de los procesos naturales que más impacto genera en el sector socioeconómico, especialmente para las poblaciones que dependen de la agricultura de temporal. El impacto de la sequía en México es muy diverso, siendo las porciones norte y el Altiplano Mexicano las regiones más afectadas (Ortega-Gaucin et al., 2018).

En este trabajo se presenta un análisis hidrológico superficial en la cuenca Río Tigre ubicada en el municipio de Aldama, Tamaulipas. Se han evaluado las condiciones hidrológicas en el lapso 2004 – 2016 a partir del análisis estadístico de las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración y su posible relación con procesos de sequía asociados al fenómeno El Niño Oscilación Sur. El estudio se enfoca en evaluaciones espacio-temporales del comportamiento hidrológico superficial en la cuenca utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales pueden servir como información de entrada en análisis hidrológicos detallados y el desarrollo de estrategias de aprovechamiento en zonas fuertemente afectada por recurrentes periodos de sequía.

Área de estudio

La cuenca del Río Tigre (CRT) se localiza en el municipio de Aldama, Tamaulipas, en el noreste de México. De acuerdo con INEGI (2021), la CRT tiene una superficie de 1,040.33 km² y se encuentra dentro de la región hidrológica San Fernando-Soto La Marina. Esta zona se caracteriza por una intensa actividad agrícola, la cual dispone de la mayor cantidad de concesiones de agua de la cuenca. La ganadería y la acuicultura son importantes

actividades desarrolladas en la región. En la CRT se presenta una variedad de condiciones climáticas influenciadas por su cercanía al Golfo de México y las diferencias de altitud. En las regiones norte, sur y oriental predominan condiciones cálidas mientras que en la porción sureste y noreste el clima es subhúmedo (INEGI, 1983). El área de estudio forma parte de la provincia fisiográfica Llanura Costera Del Golfo Norte (Lugo-Hubp & Córdova, 1992). La zona se caracteriza por la presencia de dos cuencas sedimentarias con rocas del Paleógeno – Neógeno, constituidas principalmente por lutitas y areniscas de ambientes continentales y marinos. Además, existe la presencia de estructuras plegadas afectadas por intrusiones del Cenozoico en la Sierra de Tamaulipas y en la Sierra de San Carlos-Cruillas (Ramírez-Fernández, 1996).

Las principales precipitaciones se presentan entre junio y septiembre, con valores promedio de 180 mm, mientras que entre noviembre a enero se registran las precipitaciones menos significativas (<35 mm mensuales en promedio) (CONAGUA, 2020). La temperatura media anual es de 24 °C, con una temperatura mínima promedio de 18 °C y temperaturas máximas de hasta 30 °C. La CRT es de tipo exorreico con un sistema de drenaje dendrítico. La corriente principal está definida por el Río Tigre, la cual tiene una longitud de 105.24 km y fluye desde el NNW al SSE a través de la cabecera municipal de Aldama. Al sureste de la Sierra de Tamaulipas se localiza el Sistema Zacatón, un área kárstica hidrotermal asociada al vulcanismo del Complejo Volcánico de Aldama y el segundo sistema de este tipo con mayor profundidad del planeta (~330 m, Gary, 2010). El acuífero Aldama-Soto La Marina es la principal fuente de agua subterránea. La estructura hidrogeológica es definida como de tipo libre y heterogéneo.

Metodología

Análisis de datos de precipitación y temperatura

Se analizó el comportamiento espacial y temporal de precipitación y evapotranspiración en la CRT. Se compilaron datos históricos de 10 estaciones climatológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (Figura 1). Cada estación cuenta con la siguiente información: ubicación geográfica, altitud, datos de precipitación, evaporación, temperatura mínima y temperatura máxima. El periodo de análisis comprendió los años 2004 a 2016, ya que se tiene una uniformidad de la información en todas las estaciones revisadas. Los datos posteriores al 2016 no se encontraron disponibles para consulta pública al momento de la redacción del presente documento. Para el periodo de evaluación existen diversos lapsos donde se carece de registros de precipitación. Se utilizaron los métodos de la media aritmética y regresión lineal para completar la falta de

datos siguiendo los criterios establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2018).

Media aritmética

Este método se aplica para casos donde no es posible contar con estaciones cercanas o se carece de series con datos completos. Se recomienda el uso del promedio aritmético

simple, cuando los datos a promediar difieren por lo menos 10% (Aparicio-Mijares, 1992):

$$P_x = \frac{\sum P}{n} \quad (1)$$

en donde P_x = precipitación faltante en la estación x , $\sum P$ = suma de precipitaciones de la estación analizada y n = número de datos.

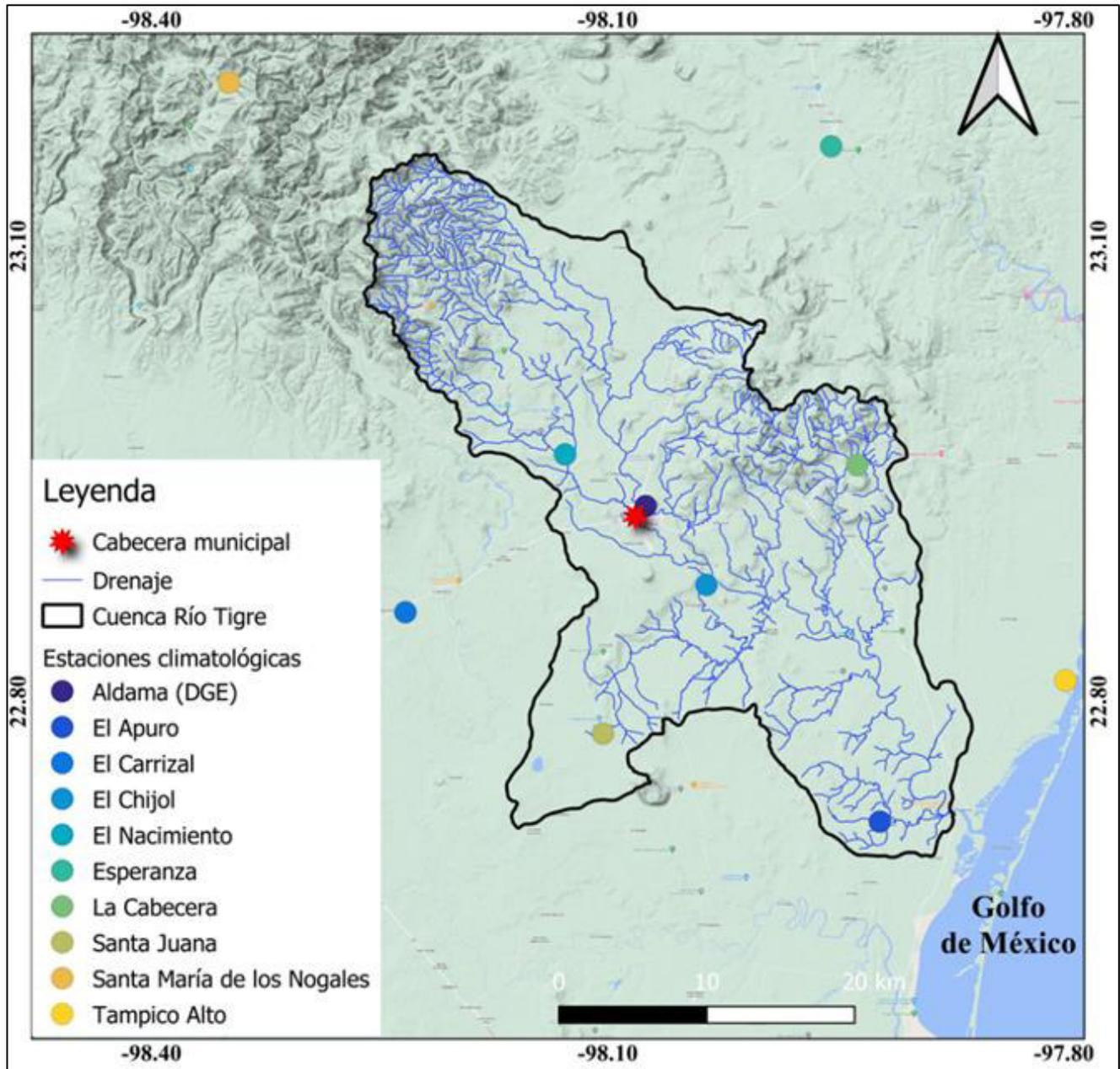


Figura 1: Ubicación de la Cuenca Río Tigre.

Regresión lineal

Este método consiste en la estimación del dato faltante a partir de regresiones lineales donde la variable meteorológica dependiente es el valor del dato faltante en la estación de interés y la independiente es el valor de la variable analizada en la estación vecina (Camuffo et al., 2022).

La aplicación de este método se recomienda para la estimación de datos mensuales y anuales. El modelo de regresión está definido por la Ecuación 2:

$$y = a + bx \quad (2)$$

en donde y = es la precipitación estimada, x = es la precipitación de la estación patrón, a = ordenada al origen y b = pendiente de la recta.

Evapotranspiración

Se utilizó el método de Thornthwaite (1944) para calcular la evapotranspiración potencial (ETP) en la cuenca mediante la Ecuación 3:

$$ETP = 16K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a \quad (3)$$

en donde K_a = factor de corrección de la duración del día que depende de la latitud y el mes del año, T_j = temperatura media en el mes j , en °C. El índice de calor anual I , es calculado a partir de la suma de los 12 índices mensuales del año considerando la Ecuación 4:

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad (4)$$

Análisis hidrológico superficial

La relación entre los aportes hídricos a la cuenca y las salidas fue estimada siguiendo la Ecuación 6 (Aparicio-Mijares, 1992):

$$P - ETP = \pm \Delta S \quad (6)$$

donde P = precipitación (mm), ETP = evapotranspiración potencial (mm) y ΔS = cambios de almacenamiento (mm). La ecuación anterior representa una primera aproximación de la conservación de los recursos hídricos mediante los aportes y pérdidas superficiales. Una estimación más precisa requiere de la instrumentación necesaria para mediciones directas en campo y la evaluación de balances hídricos detallados contemplando las pérdidas por infiltración hacia los acuíferos y las variaciones del caudal en la cuenca (Gálvez-Ordóñez, 2012). De esta forma, se efectuó la evaluación de las condiciones hidrológicas superficiales de la CRT para seis periodos comprendidos entre

en donde j = número de meses. El coeficiente a se calcula mediante la Ecuación 5:

$$a = \frac{(675 \times 10 - 9 I3) - (771 \times 10 - 7 I2) + (179 \times 10 - 4 I1) + 0.49}{(5)} \quad (5)$$

Es necesario corregir los valores de la ETP en función de la duración del mes y del número de horas de insolación teórica. Estas variables están relacionadas con la latitud en la que se ubica la estación meteorológica (Martín-Clemente et al., 2015).

Sequía

La información de sequía para la región se obtuvo del Monitor de Sequía en México a cargo del Servicio Meteorológico Nacional. La identificación de condiciones de sequía se realiza considerando diversos indicadores como el Índice Estandarizado de Precipitación, la Anomalía de Lluvia en Porcentaje de lo Normal, el Índice Satelital de Salud de la Vegetación y el Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (CONAGUA, 2022). Para la CRT, la plataforma registra información mensual a partir del 2003. Se definieron diferentes periodos de interés de acuerdo con la duración de los episodios de sequía reportados para el área de estudio (Figura 2). El Monitor de Sequía define cinco intensidades de sequía: D0 (anormalmente seco), D1 (sequía moderada), D2 (sequía severa), D3 (sequía extrema) y D4 (sequía excepcional). Además, se documentó el comportamiento del fenómeno ENOS durante el periodo 2004 – 2016 a partir de la información reportada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), lo cual permitió desarrollar una comparación espacio-temporal del impacto de este fenómeno climático como agente condicionante de sequía en la CRT.

2004 y 2016: (1) 2004 – 2005, (2) 2005 – 2006, (3) 2009 – 2010, (4) 2011, (5) 2013 y (6) 2016.

El procesado y análisis geoespacial de la información climatológica se realizó en QGIS, tomando cada estación meteorológica como un nodo de referencia. El comportamiento espacial tanto de la precipitación como de la evapotranspiración se evaluó mediante interpolación IDW. Se consideraron dos escenarios potenciales: un escenario positivo ($P > ETP$) fue evidencia de un régimen húmedo, mientras que un escenario negativo ($P < ETP$) representó una condición de déficit o seca.

Resultados

Distribución variables climáticas

La precipitación mínima promedio dentro de la cuenca estimada fue de 104.4 mm, mientras que el valor máximo alcanzó 191.1 mm. En la Figura 3 se ilustra la distribución de la

precipitación en la cuenca para los periodos de interés. De manera general, la parte central recibe la mayor acumulación de precipitación, lo cual ha sido registrado en las estaciones Aldama, El Nacimiento y El Chijol. Las áreas norte y noroeste también presentan acumulados importantes. Por otro lado, los valores mínimos de temperatura han sido registrados en las estaciones Santa María de los Nogales (13.4°C) y Aldama

(15.4°C). Los valores máximos fueron registrados en las estaciones Santa Juana (31.4°C) y El Chijol (30.7°C). Con estos datos se estimó la tasa de evapotranspiración en la CRT (Figura 4). Esta se incrementó con el paso del tiempo, siendo la estación Santa Juana la que registra el valor más alto. Sin embargo, en algunas estaciones como El Apuro y La Esperanza el parámetro presenta un comportamiento irregular.

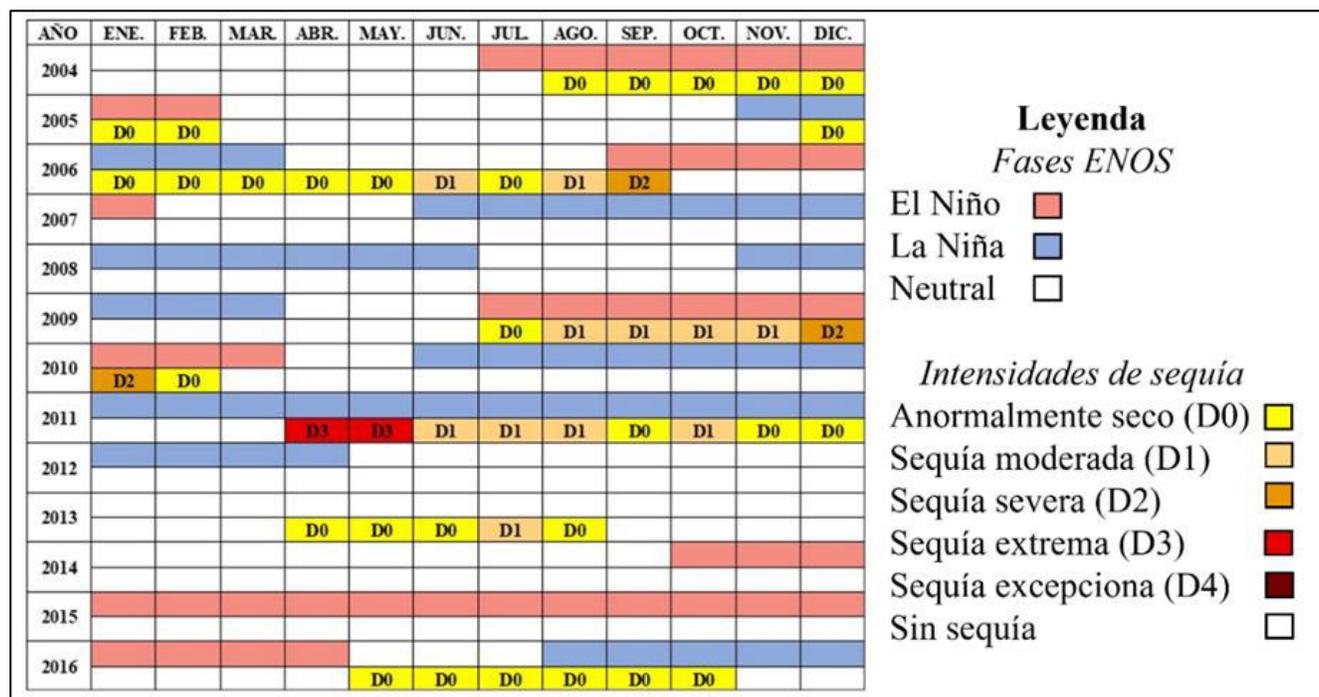


Figura 2: Comparación entre los distintos eventos de sequía reportados por el Monitor de Sequía en México y el desarrollo de las fases de ENOS en el área de estudio.

Escenarios hídricos

Periodo 2004 – 2005

En el segundo semestre del 2004 y hasta el primer bimestre del 2005 se registró una condición anormalmente seca (D0) en la CRT. Este periodo de siete meses coincidió con el desarrollo de una fase El Niño. El periodo de sequía terminó mientras el fenómeno ENOS se encontraba en transición de una fase El Niño a una Neutral. El balance estimado para este periodo fue de valores negativos (-58 a -2 mm), lo que es indicador de un déficit en las condiciones hidrológicas de la cuenca (Figura 5a). El mayor impacto se presentó en las porciones sur y noreste del área de estudio, con valores entre -50 y -30 mm. La zona central presentó un déficit de -10 mm, valor que contrasta con los máximos estimados en las otras regiones.

Periodo 2005 – 2006

Este periodo de sequía fue el de mayor duración (10 meses). Esta condición prevaleció desde diciembre del 2005 hasta septiembre del 2006, siendo contemporánea a una transición de una fase La Niña a una fase Neutral y finalmente a una fase El Niño. Durante este episodio se presentó un incremento en el impacto de las condiciones de sequía en la cuenca. El periodo inició en diciembre del 2005 con una fase D0, la cual se prolongó hasta mayo del 2006, principalmente bajo condiciones de La Niña. En junio y agosto 2006 se presenta una fase Neutral, caracterizado por una sequía moderada (D1), concluyendo con una sequía severa (D2), la cual corresponde con el inicio de una fase El Niño.

Este periodo se caracterizó por una condición de déficit, comparable con los resultados del periodo 2004 – 2005. Se identificaron valores negativos, con un intervalo que cubre de -70 hasta -5 mm (Figura 5b). Al igual que el periodo 2004 – 2005,

el mayor impacto se presentó en las zonas sur y noreste de la CRT. El impacto fue más moderado en la parte central de la cuenca, con estimaciones que alcanzaron magnitudes entre -30 y -20 mm de déficit.

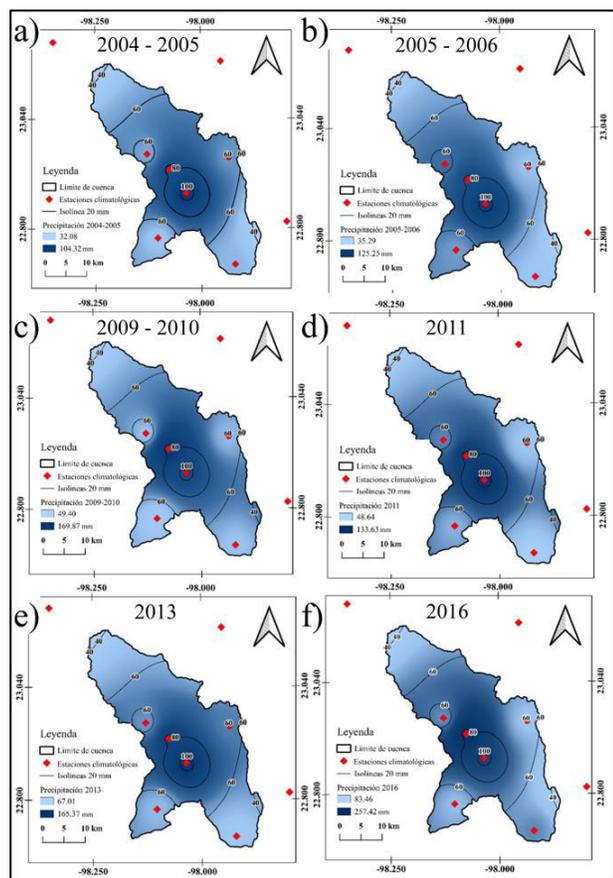


Figura 3: Distribución de la precipitación en la CRT para los periodos de interés: (a) 2004 – 2005, (b) 2005 – 2006, (c) 2009 – 2010, (d) 2011, (e) 2013 y (f) 2016.

Periodo 2009 – 2010

Para julio del 2009 se reportaron condiciones de sequía anormalmente secas (D0). Esto se relacionó con el inicio de una fase El Niño que se extendió hasta inicios del 2010. El comportamiento de la sequía se fue agravando después de julio del 2009, en transición a una fase de sequía moderada de agosto a noviembre del mismo año (D1). La condición se agravó alcanzando intensidades de sequía severa (D2) entre diciembre del 2009 y enero del 2010, dentro de la misma fase ENOS.

El escenario de la Figura 5c muestra valores negativos en la mayor parte de la cuenca, lo cual correspondería con un déficit asociado al incremento en las condiciones de sequía de D0 a D2. Sin embargo, en la parte central de la cuenca cercana a la cabecera municipal del Aldama se registraron valores positivos, típicos de condiciones húmedas. El rango de valores para este escenario oscila entre -51 hasta 69 mm, considerando que para

este periodo se contemplan datos desde la segunda mitad del año 2009 y todo el 2010. Durante el segundo semestre del 2010 se desarrollaron fenómenos de precipitación extraordinarios que impactaron la zona de estudio (por ejemplo el huracán Alex finales de junio - inicios de julio de 2010). Dichos eventos aportaron una gran cantidad de precipitación que fue distribuida en toda la porción noreste del país, lo cual se ve representado por valores positivos de humedad para este periodo, aminorando el impacto de la sequía en dicho periodo.

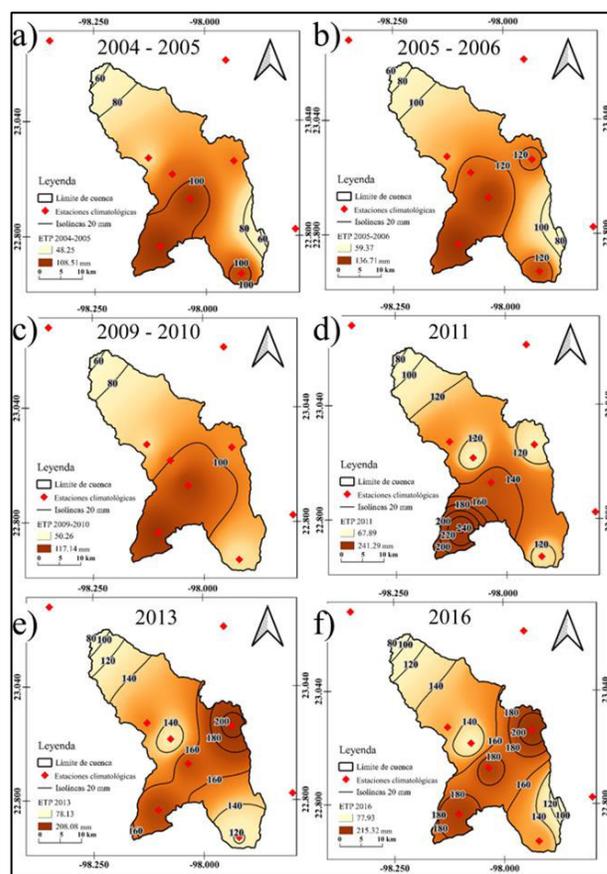


Figura 4: Distribución de la evapotranspiración en la CRT para los periodos de interés: (a) 2004 – 2005, (b) 2005 – 2006, (c) 2009 – 2010, (d) 2011, (e) 2013 y (f) 2016.

Periodo 2011

El escenario del año 2011 (Figura 5d) contempla uno de los periodos de sequía más severos que ha impactado el norte del país en las últimas décadas. Durante abril y mayo se reportaron intensidades de sequía extrema (D3), las condiciones más críticas reportadas para el periodo de estudio. Esta situación fue volviéndose menos crítica durante el segundo semestre del año, con transición entre sequías moderadas (D1) a condiciones anormalmente secas (D0) al final del año 2011. Prácticamente todo el año 2011 se desarrolló en condiciones de La Niña, aunque estas condiciones se extendieron hasta abril del 2012 donde no se reportaron anomalías de sequía. Los resultados muestran una

clara condición negativa típica de este periodo, con valores de déficit de hasta -162 mm. La porción suroeste de la CRT tuvo el mayor impacto durante este periodo, alcanzando los valores máximos. Las porciones sureste y noreste presentaron fuertes valores negativos, entre los -60 y -40 mm. Además, los resultados estimados para este periodo detectaron anomalías positivas al norte de la porción central. Esta situación se puede correlacionar con el aporte de humedad derivado del paso de la tormenta tropical Arlene a finales de junio del año 2012, lo cual resalta la influencia de eventos de precipitación extraordinarios en la cuenca y en la disminución del impacto de la sequía. Durante este periodo, las condiciones de sequía pasaron de intensidades D3 a D0.

la CRT las zonas más afectadas. Sin embargo, resaltan algunas porciones de superficie con condiciones positivas en la zona central. Las anomalías positivas pueden ser relacionadas con el paso de ciclones tropicales en este periodo, como la tormenta tropical Barry (mediados de junio) y Fernand (mediados de agosto). Aunque estas tormentas tropicales disiparon su mayor humedad hacia el sur de la zona de estudio en el estado de Veracruz, algunas precipitaciones fueron registradas dentro de la CRT.

Periodo 2016

Entre junio y octubre del 2016 se presentaron condiciones anormalmente secas (D0) en la CRT, evolucionando de una fase Neutral a condiciones de La Niña. Las condiciones hidrológicas para este periodo se caracterizaron por mostrar contrastantes valores entre los máximos y los mínimos estimados. La Figura 5f muestra que se han identificado zonas con un déficit elevado, principalmente las porciones noreste y suroeste de la zona de estudio con valores que alcanzan hasta -81 mm. Por otro lado, existen zonas con un notable aporte de humedad registrando valores de hasta 137 mm, principalmente localizados en la zona centro-noroeste de la cuenca. Pese a las condiciones anormalmente secas durante el segundo semestre del año 2016, se registraron precipitaciones importantes en la zona de estudio, lo cual aportó humedad en la región y disminuyó el impacto de la intensidad de sequía.

Discusión

Existe un consenso general de que muchas regiones del mundo experimentan sequías cada vez más largas y severas como consecuencia del cambio climático. Se ha señalado que el calentamiento global es responsable de un incremento en la temperatura, y como consecuencia, de altas tasas de evapotranspiración y una disminución en la cantidad de precipitación en muchas zonas del planeta (Balting et al., 2021). La intensidad del fenómeno ENOS puede aumentar para el final del siglo XXI en aproximadamente un 15%, ocasionando eventos meteorológicos más extremos asociados a las fases El Niño y La Niña (McPhaden et al., 2020).

En este trabajo se han documentado seis periodos de sequía durante el periodo 2004 – 2016 en la cuenca del Río Tigre. Se han detectado diferentes intensidades en las condiciones de sequía, desde comportamientos anormalmente secos (D0) y hasta fases extremas (D3) a través de 45 meses con registro de sequía. En 29 meses (65% del periodo) se tuvieron condiciones de sequía de intensidad D0, mientras que durante 11 meses (24%) se observaron intensidades D1. Durante 3 meses (7%) se presentaron sequías severas (D2) y solo durante 2 meses (4%) la

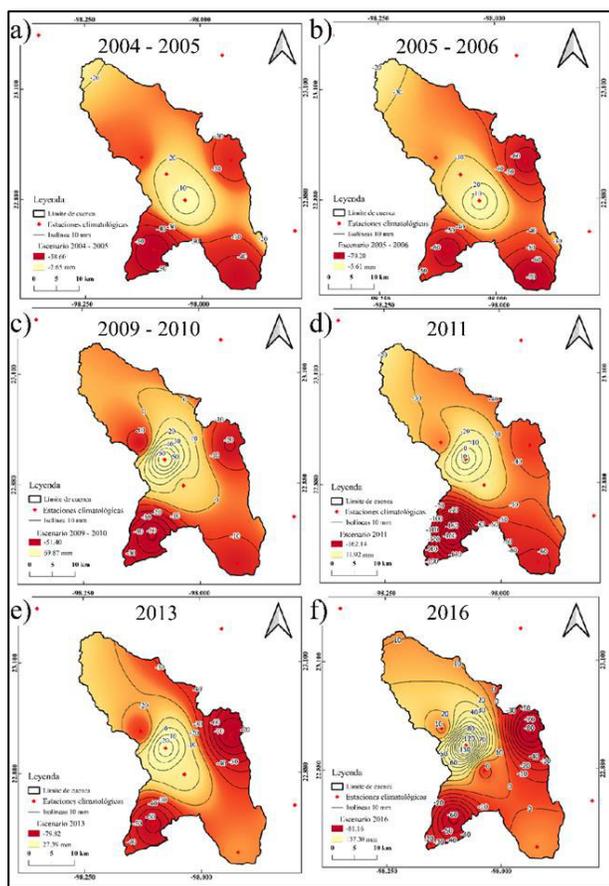


Figura 5: Escenarios hídricos de la CRT para los periodos de interés: (a) 2004 – 2005, (b) 2005 – 2006, (c) 2009 – 2010, (d) 2011, (e) 2013 y (f) 2016.

Periodo 2013

Durante los meses de abril a agosto del año 2013 se reportaron condiciones anormalmente secas (D0) a sequía moderada (D1, en julio). Estas condiciones se presentaron en una fase Neutral, situación que prevaleció hasta finales del 2014. El resultado para este periodo indica un déficit, con valores entre 27 y -79 mm (Figura 5e), siendo las porciones suroeste y noreste de

región experimentó las condiciones más extremas de sequía (D3).

Estos eventos de sequía presentan una relación espacio-temporal casi simultánea con efectos del fenómeno ENOS en la región. Tres periodos de sequía (2005 – 2006, 2011 y 2016) se desarrollaron principalmente bajo condiciones de la fase La Niña, alcanzando las intensidades de sequía más extrema (D3) entre abril y mayo del 2011. Por otro lado, solo dos eventos de sequía (2004 – 2005 y 2009 – 2010) ocurrieron en condiciones de El Niño. El periodo de sequía del 2013 ocurrió en condiciones neutrales dentro del fenómeno ENOS. El 36% de los meses se vieron afectados por condiciones climáticas relacionadas a La Niña, 36% por El Niño y el restante 28% se desarrolló bajo condiciones neutrales. Aunque existe una paridad entre el número de procesos de sequía en condiciones de El Niño y La Niña, resultan evidentes algunos patrones. Cuando el proceso de sequía inició en condiciones de El Niño las condiciones de sequía se comportaron como anormalmente secas y hasta sequía moderada. Sin embargo, cuando el proceso de sequía termina en fase El Niño hacia la transición a una fase La Niña, las condiciones de sequía son notoriamente contrastantes, prevaleciendo características desde anormalmente secas y hasta sequía severa o extrema.

El análisis permite determinar que la cuenca sufre un mayor estrés hídrico durante los periodos de sequía, situación que es mitigada durante la ocurrencia de breves periodos de precipitación principalmente asociados a tormentas tropicales o huracanes. Esto ha afectado de manera notoria las condiciones de aprovechamiento del recurso hídrico en la zona de estudio. Una medida que ayude a mitigar el impacto asociado a los fenómenos de sequía podría alcanzarse mediante la mejora del riego y la captación del agua en regiones donde la vulnerabilidad de la infraestructura es alta. El aprovechamiento de fuentes subterráneas también puede verse comprometido en el futuro cercano, principalmente bajo el contexto del cambio climático, por lo que se requiere la implementación de planes estratégicos para cuidar los recursos disponibles y establecer medidas de abastecimiento racionales y sostenible.

Conclusiones

En este trabajo se presentó un análisis del desarrollo de patrones de sequía en la cuenca del Río Tigre en Aldama, Tamaulipas, en el noreste de México. A partir de la evaluación de las condiciones hídricas superficiales, se ha estimado el comportamiento hidrológico en la cuenca durante periodos de sequía y su relación con la ocurrencia del fenómeno El Niño Oscilación Sur. Los eventos de sequía documentados se distribuyen en un periodo de 45 meses, donde se presentan comportamientos variables desde anormalmente seco (D0) hasta sequía extrema (D3). Las condiciones más severas de sequía se

presentaron durante la fase de La Niña. El análisis permite determinar que la cuenca se encuentra frecuentemente bajo estrés hídrico, situación que empeora durante los periodos de sequía, pero que es mitigada durante la ocurrencia de breves periodos de precipitación principalmente asociados a ciclones tropicales.

Este comportamiento ha impactado en la disponibilidad del recurso, afectando drásticamente su aprovechamiento por parte de distintas comunidades ubicadas en la cuenca. Los resultados pueden ser utilizados en estrategias de planeación, gestión del uso y aprovechamiento del recurso hídrico en la región, así como su implementación en zonas vecinas en el noreste del país donde las condiciones de disponibilidad y abastecimiento se han tornado críticas en los últimos años.

Referencias

- Abiy, A.Z., Melesse, A.M., Seyoum, W.M., Abtey, W. (2019): Drought and climate teleconnection and drought monitoring". *Extreme Hydrology and Climate Variability*, 275-295.
- Ahmed, S.S., Bali, R., Khan, H., Mohamed, H.I., Sharma, S.K. (2021): Improved water resource management framework for water sustainability and security". *Environmental Research*, 201, 111527.
- Aparicio-Mijares, F.J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. *Limusa*. México. 302pp.
- Balting, D.F., Aghakouchak, A., Lohmann, G., Ionita, M. (2021): Northern Hemisphere drought risk in a warming climate". *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 4 (61), 1-13.
- Camuffo, D., Becherini, F., della Valle, A., Zanini, V. (2022): A comparison between different methods to fill gaps in early precipitation series". *Environmental Earth Sciences*, 81, 345.
- Chiang, F., Mazdiyasi, O., AghaKouchak, A. (2021): Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity". *Nature Communications*, 12, 2754.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020): Actualización de la Disponibilidad Media Anual De Agua Subterránea Acuífero 2809 Aldama-Soto La Marina estado de Tamaulipas". *Reporte técnico CONAGUA*, 41 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022): Monitor de Sequía de México", <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>.
- Díaz, H.F., Hoerling, M.P., Eischeid, J.K. (2001): ENSO variability, teleconnections and climate change". *International Journal of Climatology*, 21, 1845-1862.

- Gálvez-Ordóñez, J.J. (2012): Cartilla técnica: balance hídrico superficial". *Sociedad Geográfica de Lima*, 44 pp.
- Gary, M.O. (2010): Karst Hydrogeology and Speleogenesis of Sistema Zacatón". *Association for Mexican Cave Studies Bulletin*, 21, 1-119.
- Gosling, S., Arnell, N.W. (2016): A global assessment of the impact of climate change on water scarcity". *Climate Change*, 134, 371-385.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (INEGI) (1983): Síntesis geográfica del estado de Tamaulipas". *Secretaría de Programación y Presupuesto*, 160 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2021): Simulador de flujos de aguas de cuencas hidrológicas (SIATL)". https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/.
- Larkin, N.K., Harrison, D.E. (2005): Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter". *Geophysical Research Letters*, 32(16), L16705.
- Latif, M., Keenlyside, N.S. (2009): El Niño/Southern Oscillation response to global warming". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(49), 20578-20583.
- Lugo-Hubp, J., Córdova, C. (1992): Regionalización geomorfológica de la República Mexicana". *Investigaciones geográficas*, 25, 25-63.
- Martín-Clemente, C.R., Sosa Ramírez, J., Maass Moreno, M., Luna Ruíz, J.J., Meráz Jiménez, A.J., Flores Ancira, E. (2015): Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales". *Terra Latinoamericana*, 33(1), 17-26.
- McPhaden, M.J., Santoso, A., Cai, W. (2020): El Niño Southern Oscillation in a changing climate". *John Wiley & Sons*, 528 pp.
- Ortega-Gaucin, D., de la Cruz Bartolón, J., Castellano Bahena, H.V. (2018): Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México". *En Lobato, R., Pérez, A. (eds.), Agua y Cambio Climático. Instituto Mexicano del Agua*. México, 78-103.
- Paeth, H., Scholten, A., Friederichs, P., Hense, A. (2008): Uncertainties in climate change prediction El Niño-Southern Oscillation and monsoons". *Global and Planetary Change*, 60, 265-288.
- Ramírez-Fernández, J.A. (1996): Zur Petrogenese des Alkalikomplexes der Sierra de Tamaulipas, NE-Mexiko". *Universidad de Freiburg, Alemania, tesis doctoral*, 316 pp.
- Thornthwaite, C.W. (1944): Report of the Committee on Transpiration and Evaporation 1943-44". *Transactions of the American Geophysical Union*, 25, 683-693.
- World Meteorological Organization (WMO) (2018): Guide to climatological practices". *WMO-No. 100*, Ginebra, Suiza, 153 pp.