



## Analysis of the productive response to climate variability in exotic and native vegetation types in the Sonoran Desert

## Análisis de la respuesta productiva ante la variabilidad climática en tipos de vegetación exótica y nativa del Desierto Sonorense

Sofía Choza-Farías; Jose Raúl Romo-Leon\* ; Alejandro E. Castellanos-Villegas

Universidad de Sonora, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n., Col. Centro, Hermosillo, Sonora, México. C. P. 83000.

\*Corresponding author: [jose.romo@unison.mx](mailto:jose.romo@unison.mx)

### Abstract

The introduction of buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) to increase forage production has caused modifications in large extensions of land in the Sonoran Desert. In addition, our knowledge about the influence of climatic phenomena, such as El Niño, on vegetation productivity dynamics is limited. The present work aims to analyze the photosynthetic/productive activity of Sonoran Desert vegetation in subtropical shrub and buffel grassland sites to determine differences between phases of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon. Study sites were established in vegetation communities with and without buffel grass. “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)” satellite images were acquired to derive the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in 16-day composites. Information was obtained about the different phases of El Niño from 2001 to 2017. The results suggest higher productive activity during the Neutral phase than during the El Niño or La Niña phases. Also, subtropical shrub presents higher productive activity than buffel grasslands in any of the analyzed season-phase combinations, except in La Niña during summer.

**Keywords:** Climate patterns, precipitation, productivity, arid zones.

### Resumen

La introducción de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) para incrementar la producción de forraje ha provocado modificaciones en grandes extensiones de terreno del Desierto Sonorense. Aunado a lo anterior, nuestro conocimiento acerca de la influencia de fenómenos climáticos, como El Niño, sobre la dinámica de productividad en la vegetación, es limitado. El presente trabajo pretende analizar la actividad fotosintética/productiva de la vegetación del Desierto Sonorense en sitios con matorral subtropical y praderas de buffel para determinar diferencias entre fases del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO acrónimo en inglés). Se establecieron sitios de estudio en comunidades vegetales con y sin buffel. Se adquirieron imágenes satelitales del “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)” para derivar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, acrónimo en inglés) en compuestos de 16 días. Se obtuvo información acerca de las diferentes fases de El Niño desde 2001 hasta 2017. Los resultados sugieren actividad productiva mayor durante la fase Neutra que durante las fases El Niño o La Niña. También, el matorral subtropical presenta mayor actividad productiva que las praderas de buffel en cualquiera de las combinaciones estación-fase analizadas, excepto en La Niña durante el verano.

**Palabras clave:** Patrones climáticos, precipitación, productividad, zonas áridas.

Please cite this article as follows (APA 6): Choza-Farías, S., Romo-Leon, J. R., & Castellanos-Villegas, A. E. (2021). Analysis of the productive response to climate variability in exotic and native vegetation types in the Sonoran Desert. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 20(1), e2021203. doi: [10.5154/r.rchsza.2021.20.3](http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.20.3)

Received: October 10, 2019 / Accepted: July 15, 2021.



## Introduction

Currently, all ecosystems on Earth are threatened by anthropogenic activities (Vitousek, Mooney, Lubchenco, & Melillo, 1997), which cause significant changes (extent and floristic composition) in land cover. In arid zones around the world, primary activities (e.g., agriculture, livestock, and fish) constitute major drivers and precursors of land-use change (Romo-Leon, Van Leeuwen, & Castellanos-Villegas, 2014; Mendez-Estrella, Romo-Leon, Castellanos, Gandarilla-Aizpuro, & Hartfield, 2016; Vitousek, et al., 1997). These activities often modify the eastern coverage and, therefore, the phenological and physiological dynamics of the vegetation (Bustamante-Icedo, Romo-Leon, Castellanos-Villegas, Mendez-Estrella, & Gandarilla-Aizpuro, 2019). In addition to the above, the presence of climatic phenomena, in continuous modification (Fedorov & Philander, 2000), contribute to create scenarios where it is difficult to predict what will be the response of the different ecosystems (pristine or modified) in terms of community function. Moreover, land cover modification in many dryland ecosystems leads to the introduction of non-native species, which show a high resistance to climatic variation and are highly competitive with site species (Hinojo-Hinojo et al., 2019).

In northwestern Mexico, specifically in the state of Sonora, agricultural and livestock practices have brought with them the introduction of exotic species (Castellanos, Yanes, & Valdez-Zamudio, 2002; Castellanos et al., 2010; Bravo, Doode-Matsumoto, Castellanos-Villegas, & Espejel-Carbajal, 2010; Ibarra-Flores, Moreno Medina, Martín, Denogean Ballesteros, & Gerlach Barrera, 2005). The objective is to produce crops that did not previously exist in the region, as a strategy to increase forage production in pastures for cattle. One of the most widespread practices in the region is the planting of buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) original from Africa. This grass was introduced in 1950 in North America to improve pasture conditions in arid and semi-arid regions (Franklin & Molina-Freaner, 2010). As an exotic species, with physiological characteristics that allow it to adapt to the region (Ramírez, 1999; Sanderson, Voight, & Jones, 1999; Ramírez et al., 2001), its introduction has caused 1) large extensions of land with natural vegetation to be actively replaced by buffelgrass savannas, and 2) the invasion by this species in native vegetation sites where it was not intentionally introduced (Burquez-Montijo, Miller, & Martínez-Yrizar, 2002; Castellanos et al., 2002, 2010; Johnson & Navarro, 1992).

Several works have documented processes such as desertification (Castellanos, et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005; Reynolds, et al.,

## Introducción

Actualmente, todos los ecosistemas de la Tierra son amenazados por actividades antropogénicas (Vitousek, Mooney, Lubchenco, & Melillo, 1997), las cuales provocan cambios significativos (extensión y composición florística) en la cobertura de suelo. En las zonas áridas alrededor del mundo, las actividades primarias (ej. agricultura, ganadería y pesca) constituyen grandes controladores y precursores del cambio de uso de suelo (Romo-Leon, Van Leeuwen, & Castellanos-Villegas, 2014; Mendez-Estrella, Romo-Leon, Castellanos, Gandarilla-Aizpuro, & Hartfield, 2016; Vitousek, et al., 1997). Esas actividades, a menudo, modifican la cobertura del este y, por ende, la dinámica fenológica y fisiológica de la vegetación (Bustamante-Icedo, Romo-Leon, Castellanos-Villegas, Mendez-Estrella, & Gandarilla-Aizpuro, 2019). Aunado a lo anterior, la presencia de fenómenos climáticos, en continua modificación (Fedorov & Philander, 2000), contribuyen a crear escenarios en donde es difícil predecir cuál será la respuesta de los diversos ecosistemas (prístinos o modificados) en términos de función de las comunidades. Aún más, la modificación de la cobertura de suelo, en muchos de los ecosistemas de zonas áridas, conlleva a la introducción de especies no nativas, las cuales muestran una gran resistencia a la variación climática y son muy competitivas con las especies del sitio (Hinojo-Hinojo et al., 2019).

En el Noroeste de México, específicamente en el estado de Sonora, las prácticas agrícolas y ganaderas han traído consigo la introducción de especies exóticas (Castellanos, Yanes, & Valdez-Zamudio, 2002; Castellanos et al., 2010; Bravo, Doode-Matsumoto, Castellanos-Villegas, & Espejel-Carbajal, 2010; Ibarra-Flores, Moreno Medina, Martín, Denogean Ballesteros, & Gerlach Barrera, 2005). Lo anterior tiene como objetivo la producción de cultivos que antes no existían en la región, como estrategia para incrementar la producción de forraje en agostaderos para el ganado vacuno. Una de las prácticas más extendidas en la región es la siembra de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*) originario de África. Este pasto fue introducido en 1950 en Norteamérica con el fin de mejorar las condiciones de los agostaderos en las regiones áridas y semiáridas (Franklin & Molina-Freaner, 2010). Al ser una especie exótica, con características fisiológicas que le permiten adaptarse a la región (Ramírez, 1999; Sanderson, Voight, & Jones, 1999; Ramírez et al., 2001), su introducción ha ocasionado que 1) grandes extensiones de terreno con vegetación natural hayan sido remplazadas activamente por sabanas de buffel, y 2) la invasión por parte de dicha especie en sitios de vegetación nativa donde no fue introducida intencionalmente (Burquez-Montijo, Miller, & Martínez-Yrizar, 2002; Castellanos et al., 2002, 2010; Johnson & Navarro, 1992).

2007; Sivakumar, 2007; Pontifes, García-Meneses, Gómez-Aíza, Monterroso-Rivas, & Caso-Chávez, 2018), loss of biodiversity (Valdez-Zamudio, Castellanos Villegas, & Marsh, 2000; Romo-León, van Leeuwen, & Castellanos, 2013), introduction of fire dynamics (O'Hara, Street-Perrot, & Burt 1993; Brooks, et al., 2004), modification to carbon fluxes (Hinojo-Hinojo et al., 2016, 2019) and modifications to the structure, composition and floristic function of native ecosystems (Castellanos et al., 2010 and 2013), derived from the introduction of buffel grass in the Sonoran Desert. However, information documenting and comparing how native ecosystems and introduced buffel savannas respond to specific phases of global climate systems is scarce. This is of particular importance, as the evolution of these systems is directly affected by global climate change phenomena, which may increase the vulnerability of dryland ecosystems (Holmgren & Scheffer, 2001; Holmgren, et al., 2006).

El Niño, also known as the El Niño South Pacific Oscillation (ENSO), is considered one of the most important global climatic phenomena, which suggests a close interaction between the ocean and the atmosphere on a large scale (Bowers, 2005). ENSO has an erratic annual/interannual behavior; however, it can have a cyclical behavior of between 2 and 7 years (Quinn, Neal, & Antunez de Mayolo 1987; Webb & Betancourt, 1992). This phenomenon presents three phases: El Niño (warm phase), La Niña (cool phase), and neutral phase (when none of the Niño or Niña phases register significantly in the Oceanic Niño Index (ONI). El Niño and La Niña phases last 9 to 12 months in general, but some can last for years (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2018).

Particularly in northwestern Mexico, in the Sonoran Desert, the presence of different ENSO phases alter precipitation patterns, modify water input to vegetation and the carbon sequestration process (Castellanos et al., 2010; Hinojo-Hinojo et al., 2016; Montaña et al., 2016). Because of the above, the productive response of vegetation can be susceptible to changes in precipitation and temperature patterns (Crimmins, Crimmins, & Bertelsen, 2010; Hinojo-Hinojo et al., 2016). Thus, climate changes associated with the ENSO phenomenon can have significant impacts on arid zones (Holmgren et al., 2006; Zolotokrilyn, Titkova, & Brito-Castillo, 2016). The climate pattern is very complex and causes variations in ocean temperatures in the equatorial Pacific, changes normal surface temperatures, and can have large-scale impacts on both ocean processes and global climate conditions (NOAA, 2018). For example, in the El Niño phase, ocean waters along South America and California warm up to higher than normal temperatures; this leads to higher than normal rainfall events in some parts of

Diversos trabajos han documentado procesos como desertificación (Castellanos, et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005; Reynolds, et al., 2007; Sivakumar, 2007; Pontifes, García-Meneses, Gómez-Aíza, Monterroso-Rivas, & Caso-Chávez, 2018), pérdida de biodiversidad (Valdez-Zamudio, Castellanos Villegas, & Marsh, 2000; Romo-León, van Leeuwen, & Castellanos, 2013), introducción de dinámicas de fuego (O'Hara, Street-Perrot, & Burt 1993; Brooks, et al., 2004), modificación a los flujos de carbono (Hinojo-Hinojo et al., 2016, 2019) y modificaciones de la estructura composición y función florística de los ecosistemas nativos (Castellanos et al., 2010 y 2013), derivados de la introducción de zacate buffel en el Desierto Sonorense. Sin embargo, la información que documente y compare cómo los ecosistemas nativos y las sabanas introducidas de buffel responden ante fases específicas de sistemas climáticos globales es escasa. Esto es de especial importancia, ya que la evolución de estos sistemas es directamente afectada por fenómenos globales de cambio en el clima, lo cual puede aumentar la vulnerabilidad de los ecosistemas de zonas áridas (Holmgren & Scheffer, 2001; Holmgren, et al., 2006).

El Niño conocido también como Oscilación del Pacífico Sur (ENSO), por sus siglas en inglés), es considerado uno de los fenómenos climáticos globales más importantes, el cual sugiere una estrecha interacción entre el océano y la atmósfera a gran escala (Bowers, 2005). El ENSO presenta un comportamiento anual/interanual errático; sin embargo, puede tener un comportamiento cíclico de entre 2 y 7 años (Quinn, Neal, & Antunez de Mayolo 1987; Webb & Betancourt, 1992). Este fenómeno presenta tres fases: El Niño (fase cálida), La Niña (fase fría) y la fase neutra (cuando ninguna de las fases Niño o Niña se registra de forma significativa en el Índice Oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en inglés). Las fases El Niño y La Niña duran de 9 a 12 meses en general, pero algunas pueden prolongarse durante años (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2018).

Particularmente en el Noroeste de México, en el Desierto Sonorense la presencia de las diferentes fases del ENSO alteran los patrones de precipitación, modifican la entrada de agua a la vegetación y el proceso de captura de carbono (Castellanos et al., 2010; Hinojo-Hinojo et al., 2016; Montaña et al., 2016). Por lo anterior, la respuesta productiva de la vegetación puede ser susceptible a los cambios de la precipitación y los patrones de temperatura (Crimmins, Crimmins, & Bertelsen, 2010; Hinojo-Hinojo et al., 2016). Así, los cambios climáticos asociados al fenómeno ENSO pueden tener impactos significativos en las zonas áridas (Holmgren et al., 2006; Zolotokrilyn, Titkova, & Brito-Castillo, 2016). El patrón climático es muy complejo y ocasiona variaciones en las temperaturas oceánicas

South America. In turn, El Niño can cause droughts in some parts of the world (Salinas-Zavala, Douglas, & Diaz, 2002; Magaña & Conde, 2003; De La Casa & Ovando, 2006). These humidity and drought conditions can affect the dynamics of matter and energy exchange in ecosystems and, consequently, the photosynthetic and productive capacity, which is manifested by changes in the greenness of vegetation (De La Casa & Ovando, 2006).

Previous work suggests that, in the Sonoran Desert region, the warm and cold phases of ENSO are responsible for precipitation anomalies (Magaña, Amador, & Medina, 1999; Salinas-Zavala et al., 2002; Magaña & Conde, 2003). Zolotokrilyn et al. (2016) evaluated moisture and drought patterns related to ENSO events in the Sonoran Desert by means of the satellite climate extremes index (SCEI) calculated with MODIS from 2000 to 2015. They found that the ENSO effect and late spring rainfall in the Sonoran Desert are related to different vegetation responses, which depend on the soil moisture that is induced by the amount of rainfall. Other studies have evaluated the relationship between summer precipitation with ENSO phases in northern Mexico, in most cases no consistent relationship could be detected (Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Arreola-Ávila, & Constante-García, 2011).

The objectives of this work are 1) to analyze how climatic phenomena alter the photosynthetic function of exotic and native ecosystems and 2) to compare the differences between photosynthetic responses in these systems in the Sonoran Desert associated with ENSO phases. This will involve the use of remote sensing and spatial analysis techniques (Jensen, 2005). Specifically, vegetation responses during the warm (El Niño), cold (La Niña) and neutral phases of ENSO were analyzed. Finally, precipitation differences associated with ENSO phases were also analyzed.

## Materials and methods

### Study Area

The Sonoran Desert biogeographic region contains multiple arid and semi-arid habitats and covers an area of 300,000 km<sup>2</sup> (Castellanos et al., 2010, 2013). This region includes parts of the states of Arizona and California, United States of America, and Baja California and Sonora, Mexico (Turner, Bowers, & Burgess 1995). The present work was carried out by considering information from the central region of the State of Sonora, on the southern border of the Sonoran Desert, previously described as Sonoran Plains (Shreve & Wiggins, 1964). The region is classified as arid-semiarid, with a bimodal precipitation regime; 80 % of precipitation occurs during the summer (Hinojo-Hinojo et al., 2019).

en el Pacífico ecuatorial, cambia las temperaturas normales de la superficie y puede tener impactos a gran escala, tanto en los procesos oceánicos como en las condiciones climáticas globales (NOAA, 2018). Por ejemplo, en la fase El Niño, las aguas oceánicas a lo largo de América del Sur y California se calientan a temperaturas mayores a las normales; esto propicia que en algunos lugares de América del Sur existan más eventos de lluvia que lo habitual. A su vez, El Niño puede ocasionar sequías en algunos lugares del mundo (Salinas-Zavala, Douglas, & Diaz, 2002; Magaña & Conde, 2003; De La Casa & Ovando, 2006). Estas condiciones de humedad y sequía pueden incidir sobre la dinámica del intercambio de materia y energía de los ecosistemas y, por consiguiente, sobre la capacidad fotosintética y productiva que se manifiesta por cambios en el verdor de la vegetación (De La Casa & Ovando, 2006).

Trabajos previos sugieren que, en la región del Desierto Sonorense, las fases cálida y fría del ENSO son las responsables de las anomalías de la precipitación (Magaña, Amador, & Medina, 1999; Salinas-Zavala et al., 2002; Magaña & Conde, 2003). Zolotokrilyn et al. (2016) evaluaron los patrones de humedad y sequía relacionados con los eventos ENSO en el Desierto Sonorense por medio del índice de satélites climáticos extremos (SCEI, por sus siglas en inglés) calculado con MODIS desde el año 2000 al 2015. Ellos encontraron que el efecto ENSO y la lluvia de finales de primavera en el Desierto de Sonora están relacionadas con diferentes respuestas de la vegetación, las cuales dependen de la humedad del suelo que es inducida por la cantidad de lluvia. Otros estudios han evaluado la relación entre la precipitación de verano con las fases del ENSO en el Norte de México, en la mayoría de los casos no se ha podido detectar una relación consistente (Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Arreola-Ávila, & Constante-García, 2011).

El presente trabajo tiene como objetivos 1) analizar cómo los fenómenos climáticos alteran la función fotosintética de ecosistemas exóticos y nativos y 2) comparar las diferencias entre las respuestas fotosintéticas en estos sistemas en el Desierto Sonorense asociadas a las fases del ENSO. Para ello se involucrará el uso de sensores remotos y de técnicas de análisis espacial (Jensen, 2005). Específicamente, se analizaron las respuestas de la vegetación durante las fases cálida (El Niño), fría (La Niña) y la neutra del ENSO. Finalmente, las diferencias de precipitación asociadas a las fases del ENSO también fueron analizadas.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La región biogeográfica del Desierto Sonorense contiene múltiples hábitats áridos y semiáridos y tiene

The study site is located in the municipality of La Colorada (Figure 1), specifically in the experimental ranch “El Churi” (28° 42’ 40.32” N and 110° 32’ 58.14” W), where the mean annual precipitation is 476 mm and the mean annual temperature is 22.8 °C (Hinojo-Hinojo et al., 2019). The relief of the area is described as a mixture of plains with rolling hills and the average elevation is 400 meters above sea level. The predominant vegetation at the site is subtropical scrub and, in more recent decades, induced buffel grasslands have replaced large extensions previously occupied by native vegetation (Castellanos et al., 2010; Hinojo-Hinojo et al., 2016). The main economic activities at this site are cattle ranching and hunting.

Within the ranch area, six sites were selected; each site has a minimum area of 100 ha. Three of these areas are made up of induced buffel grass savannas. Within these sites there are other species such as Palo Verde (*Parkinsonia aculeata*), Mesquite Terciopelo (*Prosopis velutina*), among others; however, buffel is the predominant species. The other three polygons are made up of subtropical scrub, where the most common species are Palo Blanco (*Ipomoea arborescens*) and Ocotillo (*Fouquieria macdougalii*), among others (Challenger & Soberón, 2008).

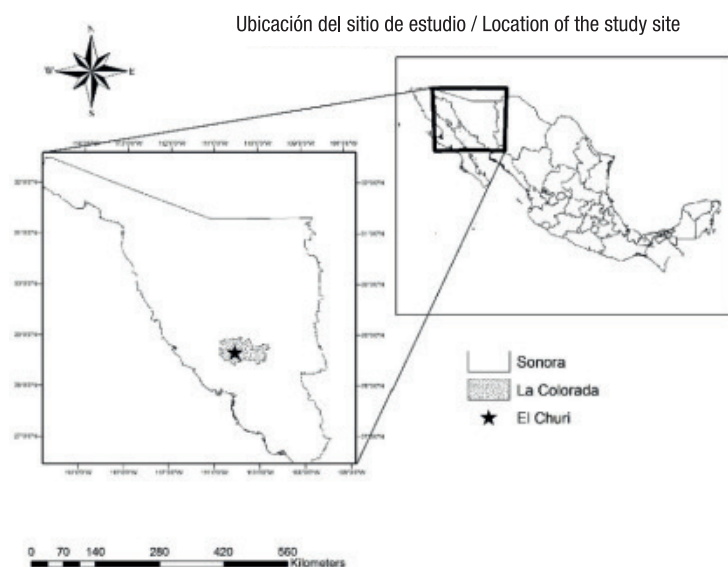
#### Database

**Measuring photosynthetic and productive response.** The MODIS sensor (installed on the Terra and Aqua satellites) is often used to derive vegetation indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to measure vegetation vigor and greenness (Tarpley, Schneider, & Money, 1984). With the NDVI it is possible

una extensión de 300 000 km<sup>2</sup> (Castellanos et al., 2010, 2013). Dicha región comprende parte de los estados de Arizona y California, Estados Unidos de América, y Baja California y Sonora, México (Turner, Bowers, & Burgess 1995). El presente trabajo se realizó al considerar información de la región central del Estado de Sonora, en la frontera sur del Desierto Sonorense, previamente descrita como Planicies de Sonora (Shreve & Wiggins, 1964). La región es catalogada como árida-semiárida, con un régimen de precipitación bimodal; el 80 % de la precipitación se presenta durante el verano (Hinojo-Hinojo et al., 2019).

El sitio de estudio se encuentra en el municipio de La Colorada (Figura 1), específicamente en el rancho experimental “El Churi” (28° 42’ 40.32” N y 110° 32’ 58.14” O), donde la precipitación media anual es de 476 mm y la temperatura media anual es de 22.8 °C (Hinojo-Hinojo et al., 2019). El relieve de la zona es descrito como una mezcla de planicies con lomeríos y la elevación media es de 400 metros sobre el nivel del mar. La vegetación predominante en el sitio es matorral subtropical y, en decenios más recientes, los pastizales inducidos de buffel han reemplazado grandes extensiones previamente ocupadas por vegetación nativa (Castellanos et al., 2010; Hinojo-Hinojo et al., 2016). Las actividades económicas principales en este sitio son la ganadería y la caza.

Dentro del área del rancho, fueron seleccionados seis sitios; cada sitio tiene un área mínima de 100 ha. Tres de estas áreas están conformadas por sabanas inducidas de zacate buffel. Dentro de estos sitios se encuentran otras especies tales como Palo Verde (*Parkinsonia aculeata*), Mesquite Terciopelo (*Prosopis velutina*), entre otras; sin



**Figure 1. Location of the study area (Central Region) in the State of Sonora, Mexico.**

**Figura 1. Localización del área de estudio (Región Central) en el Estado de Sonora, México.**

to obtain approximations of the photosynthesis behavior of plant communities at the landscape level (Fensholt, 2004).

In order to analyze proxies of the productive activity of the two types of vegetation analyzed, products derived from MODIS-Terra sensor images were obtained, specifically the MOD13Q1 product. This comprises the vegetation indices. Those products are obtained through the Earth Data service (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) (ORNL DAAC, 2017; NASA, 2018). In this work, NDVI composites with temporal resolution of 16 days and spatial resolution of 250 meters were used for the period 2001 - 2017.

Isolation and compilation of the images were done with those composites in an organized time sequence (23 composites per year, across the 16 years), using specialized photogrammetric software. Finally, the time series was analyzed to quantify photosynthetic and productive function in sites with subtropical shrub sites that have been converted to buffel grassland.

#### Precipitation measurement

**The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor** is a joint effort between the National Aeronautics and Space Administration (NASA) of the United States of America and the National Space Development Agency (JAXA) of Japan. This Mission was launched on November 27, 1997 from the Tanegashima Space Center in Japan. This satellite/sensor aims to measure the rain and energy exchange of the tropical and subtropical regions of the world. The TRMM has 25 kilometers of spatial resolution, a daily temporal resolution, and measures rainfall in millimeters per day (NASA, 2018). The rainfall instruments used in TRMM are the TRMM microwave imager (TMI), precipitation radar (PR), and the visible and infrared radiometer system (VIRS) (Kummerow, Barnes, Kozu, Shiue, & Simpson, 1998).

Specifically, TRMM product 3B43 (Figure 4) was used in this study, which has a daily temporal resolution and a spatial resolution of approximately 25 km. Once the images were obtained, precipitation (in millimeters) was derived and the summation of each month was obtained for the study area from 2001 to 2017 by considering pixels centered in the study area. Specifically, data corresponding to 16 pixels of the total product were selected; the data were averaged and analyzed to obtain 228 composites, denoting the monthly precipitation summation for the aforementioned time series (Figure 3).

**El Niño Southern Oscillation and its Phases.** Through reports from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) of the United States of America, information was obtained on the different ENSO phases

embargo, el buffel es la especie predominante. Los otros tres polígonos están conformados por matorral subtropical, donde las especies más comunes son Palo Blanco (*Ipomoea arborescens*) y Ocotillo (*Fouquieria macdougalii*), entre otras (Challenger & Soberón, 2008).

#### Bases de datos

##### Medición de la respuesta fotosintética y productiva.

El sensor MODIS (montado en los satélites Terra y Aqua) es utilizado a menudo para derivar índices de vegetación, tales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para medir el vigor y verdor de la vegetación (Tarpley, Schneider, & Money, 1984). Con el NDVI es posible obtener aproximaciones del comportamiento de la fotosíntesis realizada por las comunidades vegetales, a nivel paisaje (Fensholt, 2004). Con el fin de analizar proxies de la actividad productiva de los dos tipos de vegetación analizados, fueron obtenidos los productos derivados de imágenes del sensor MODIS-Terra, específicamente el producto MOD13Q1. Este comprende los índices de la vegetación. Esos productos se obtienen a través del servicio Earth Data (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) (ORNL DAAC, 2017; NASA, 2018). En este trabajo se utilizaron los compuestos de NDVI con resolución temporal de 16 días y resolución espacial de 250 metros para el periodo 2001 - 2017.

Con estos compuestos se procedió a aislar y compilar las imágenes en una secuencia temporal organizada (23 compuestos por año, a través de los 16 años), utilizando software fotogramétrico especializado. Finalmente, la serie de tiempo se analizó para cuantificar la función fotosintética y productiva en sitios con matorral subtropical y sitios que han sido convertidos a pradera de buffel.

##### Medición de la precipitación

El sensor “Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM por su acrónimo en inglés)” es un esfuerzo conjunto entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América y la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial (JAXA, por sus siglas en inglés) de Japón. Esa Misión fue lanzada el 27 de noviembre de 1997 desde el Centro Espacial Tanegashima en Japón. Este satélite/sensor tiene como objetivo medir el intercambio de lluvia y energía de las regiones tropicales y subtropicales del mundo. La TRMM tiene 25 kilómetros de resolución espacial, una resolución temporal diaria, y mide la precipitación en milímetros por día (NASA, 2018). Los instrumentos de lluvia utilizados en TRMM son el generador de imágenes de microondas TRMM (TMI), el radar de precipitación (PR) y el sistema de radiómetro visible e

that occurred during the time series (2001-2017). The purpose was to evaluate the amounts of precipitation in the region and the photosynthetic activity of the two types of vegetation when El Niño, La Niña and Neutral phases occurred. In the present study, moderate La Niña and strong La Niña phases were considered as “La Niña” phases. Moderate El Niño, strong El Niño and very strong El Niño were considered as “El Niño” phases. Finally, the phases reported as weak El Niño/ Niña and Neutral were considered as Neutral phase periods (NOAA, 2018) (Table 1).

#### Analysis of precipitation variation and photosynthetic and productive activity

Precipitation and NDVI data were separated into two seasons. The summer season consists of six months: May, June, July, August, September and October. The winter season consists of November, December, January, February, March and April. Once the seasons were separated, the data were summed and grouped according to the corresponding summer or winter

infrarrojo (VIRS) (Kummerow, Barnes, Kozu, Shiue, & Simpson, 1998).

En este estudio se utilizó específicamente el producto 3B43 (Figura 4) de TRMM, el cual tiene una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 25 km, aproximadamente. Una vez que las imágenes fueron obtenidas, la precipitación (en milímetros) se derivó y la sumatoria de cada mes se obtuvo para el área de estudio desde el año 2001 hasta el 2017, al considerar pixeles centrados en el área de estudio. Específicamente, los datos correspondientes a 16 pixeles del total del producto fueron seleccionados; los datos se promediaron y analizaron para obtener 228 compuestos, denotando la sumatoria de precipitación mensual para la serie de tiempo ya mencionada (Figura 3).

**El Niño Oscilación del Sur y sus Fases.** A través de los informes de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés de los Estados Unidos de América, fue obtenida la información

**Table 1. El Niño Southern Oscillation phases (Neutral, El Niño and La Niña) by year and season in the time series (2001-2017).**

**Cuadro 1. Fases de El Niño Oscilación del Sur (Neutra, El Niño y La Niña) por año y estación en la serie de tiempo (2001-2017).**

Year/ Año	Summer (May – October)/ Verano (mayo – octubre)	Winter (November – April)/ Invierno (noviembre – abril)
2001	Neutral	Neutral
2002	Niño	Neutral
2003	Neutral	Niño
2004	Niño	Neutral
2005	Neutral	Niño
2006	Neutral	Niña
2007	Niña	Niño
2008	Neutral	Niña
2009	Niño	Niña
2010	Niña	Niño
2011	Niña	Niña
2012	Neutral	Niña
2013	Neutral	Neutral
2014	Neutral	Neutral
2015	Niño	Niño
2016	Niña	Niño
2017	Neutral	Neutral

season for NDVI and precipitation.

In order to determine any significant differences in cumulative precipitation and photosynthetic and productive activity (NDVI) in two vegetation types during the summer and winter periods between ENSO phases, one-way analysis of variance and Tukey tests were performed. To determine in which ENSO phases and periods significant differences in photosynthetic and productive activity (NDVI) between vegetation types occurred/provoked, t-tests were performed. Statistical analyses were performed with R software.

## Results and discussion

### Productivity and precipitation proxies

When analyzing the NDVI time series obtained from MODIS, the phenological patterns of the species can be detected in both the subtropical shrubland and the buffel grassland (Figure 2). In most years, vegetation indices suggest two growing seasons, one in summer (which occurs between July and October) and one in winter (December-March). These patterns of photosynthesis and productivity reflect, to a large extent, the behavior of precipitation in the study area (Figure 3) with two precipitation seasons (summer and winter). To demonstrate the effect of ENSO on productivity, the mean temperature in the South Pacific was also obtained, according to reports provided by the NOAA, in order to separate the annual periods (summers and winters) corresponding to the El Niño, La Niña or Neutral phases (Table 1).

It should be noted that different phases of the ENSO phenomenon may occur during the same year. This influences the phenological and productivity patterns of vegetation (Romo, 2006). This is derived from the response of vegetation to precipitation pulses in arid zones (Noy-Meir, 1973). Taking into account the above, the different seasons were separated to carry out the analysis of comparison between vegetation types.

### Differences in precipitation between El Niño, La Niña and Neutral phases

In order to appreciate differences in the amount of precipitation between the various ENSO phases, an analysis of variance was performed. In both winter and summer seasons, the results suggest significant differences ( $P < 0.01$ ) in accumulated precipitation between ENSO phases (Figure 4). This is in agreement with previous studies generated for the region (e.g. Reyes and Mejía-Trejo, 1991; Woodhouse, 1997). This suggests that vegetation productivity is influenced by the ENSO phase, since humidity is considered an important factor for biological/phenological activity in

de las diferentes fases del ENSO que se presentaron durante la serie de tiempo (2001-2017). El propósito fue evaluar las cantidades de precipitación en la región y la actividad fotosintética de los dos tipos de vegetación cuando se presentaron las fases El Niño, La Niña y Neutra. En el presente estudio se consideraron las fases La Niña moderada y La Niña fuerte como fases de "La Niña". Como fases de "El Niño" se consideraron El Niño moderado, El Niño fuerte y El Niño muy fuerte. Finalmente, las fases reportadas como Niño/Niña débiles y Neutras, fueron consideradas como períodos de fase Neutra (NOAA, 2018) (Cuadro 1).

### Análisis de la variación de precipitación y actividad fotosintética y productiva

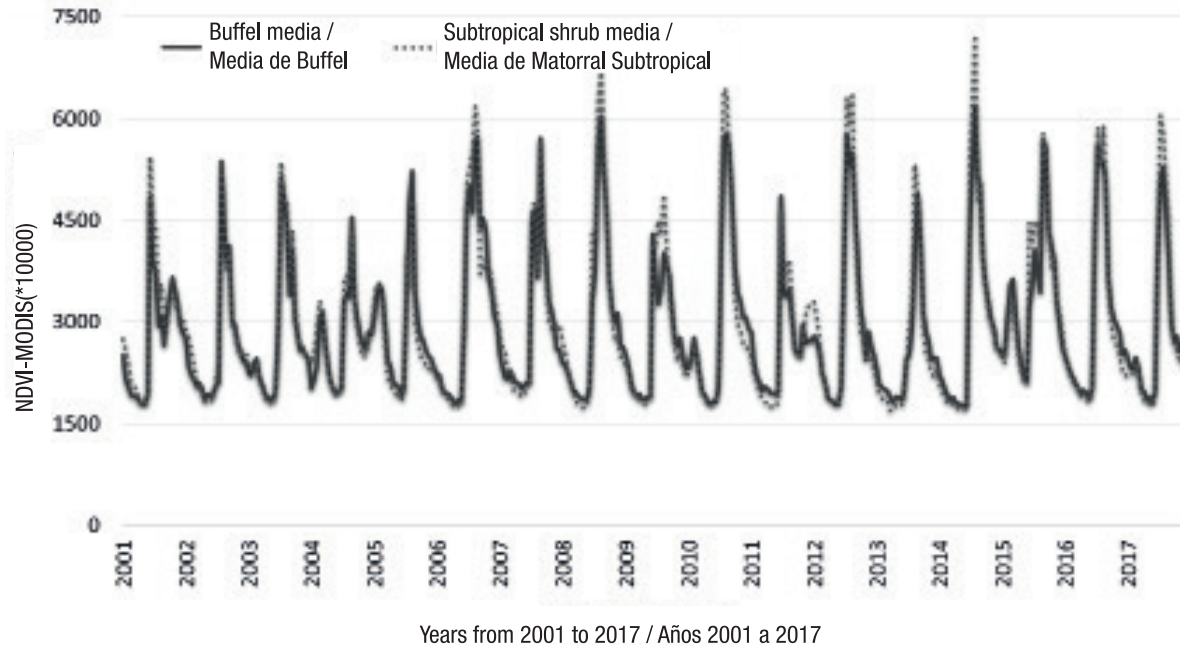
Los datos de precipitación y NDVI se separaron en dos temporadas. La temporada de verano consta de seis meses: mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. La temporada de invierno está compuesta por los meses noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril. Una vez hecha la separación de las temporadas se procedió a sumar los datos para agruparlos según la temporada de verano o invierno correspondiente para el NDVI y la precipitación.

Con el fin de determinar alguna diferencia significativa de precipitación acumulada y actividad fotosintética y productiva (NDVI) en dos tipos de vegetación durante los periodos verano e invierno entre fases del ENSO se realizaron análisis de varianza de una vía y pruebas de Tukey. Para determinar en cuales fases del ENSO y periodos se presentaron/propiciaron diferencias significativas de actividad fotosintética y productiva (NDVI) entre tipos de vegetación se realizaron pruebas de t. los análisis estadísticos se realizaron con el software R.

## Resultados y discusión

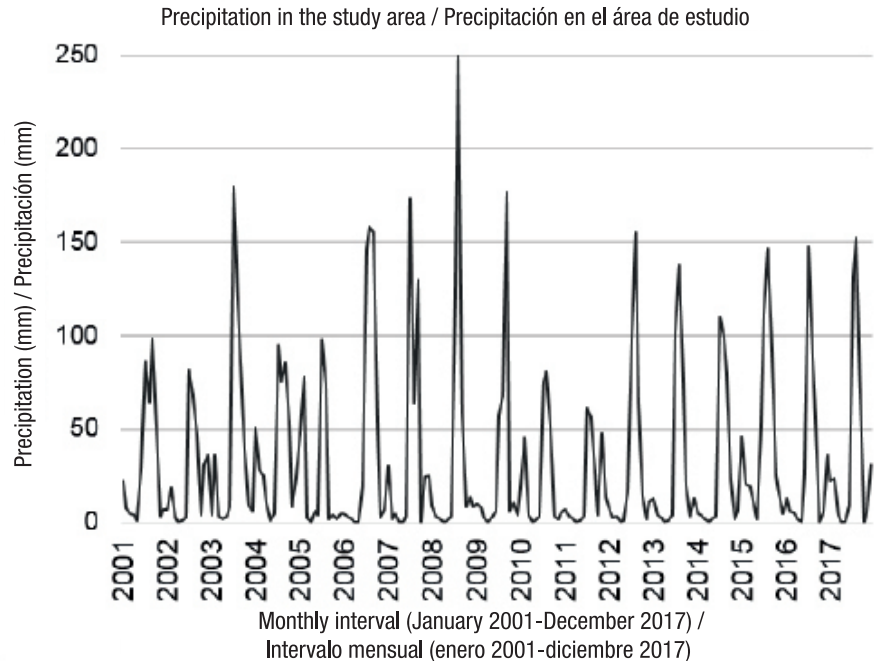
### Proxis de productividad y precipitación

Al analizar la serie de tiempo de NDVI, obtenida a partir de MODIS, los patrones fenológicos de las especies se pueden detectar, tanto en el matorral subtropical, como en la pradera de buffel (Figura 2). En la mayoría de los años, los índices de vegetación sugieren dos temporadas de crecimiento, una en verano (la cual ocurre entre julio y octubre) y otra en invierno (diciembre-marzo). Estos patrones de fotosíntesis y productividad reflejan, en gran medida, el comportamiento de la precipitación en el área de estudio (Figura 3) con dos temporadas de precipitación (verano e invierno). Para evidenciar el efecto del ENSO sobre la productividad, también se obtuvo la media de la temperatura en el Pacífico Sur, de acuerdo con informes provistos por la NOAA, y así poder separar los periodos anuales (veranos e



**Figure 2. Time series 2001 - 2017, averages of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values of two vegetation types corresponding to the first polygon of the Central Region in the State of Sonora, Mexico.**

**Figura 2. Serie de tiempo 2001 – 2017, promedios de los valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de dos tipos de vegetación correspondientes al primer polígono de la Región Central en el Estado de Sonora, México.**



**Figure 3. Precipitation in the Central Region of the State of Sonora, Mexico at monthly intervals from January 2001 to December 2017.**

**Figura 3. Precipitación en la Región Central del Estado de Sonora, México en intervalos mensuales desde enero de 2001 a diciembre de 2017.**

arid zones.

In order to better understand what the significant differences mentioned above correspond to, Tukey's *post hoc* tests were performed (Miller, 1966). The results suggest that, during the summer, more precipitation is associated with the Neutral phase than with the El Niño and La Niña phases (Figure 4a). Also, during the winter, more precipitation is associated with the Neutral phase than with the El Niño or La Niña phases. Notably, more precipitation is associated with the La Niña phase than with the El Niño phase in winter, although not significantly (Figure 4b).

Some researchers have reported that, in the Sonoran Desert, the occurrence of the ENSO phenomenon in its El Niño phase is associated with an increase in precipitation in the fall and winter seasons (Andrade & Sellers, 1988; Ropelewski & Halpert, 1986; Kiladis & Diaz, 1989; Webb & Betancourt, 1992; Cayan, Redmond, & Riddle, 1999). However, in this study covering the period 2001 - 2017, it was found that precipitation was higher when the ENSO phase is not well defined (Neutral). According to Philander (1990), one of the causes that generate inconsistencies in the effects of ENSO is that ENSO phases vary in magnitude, spatial coverage, onset and duration. This should be considered in future research in order to determine the behavior of precipitation as a function of the various meteorological and orographic factors that influence it.

#### NDVI variation associated with climatic patterns

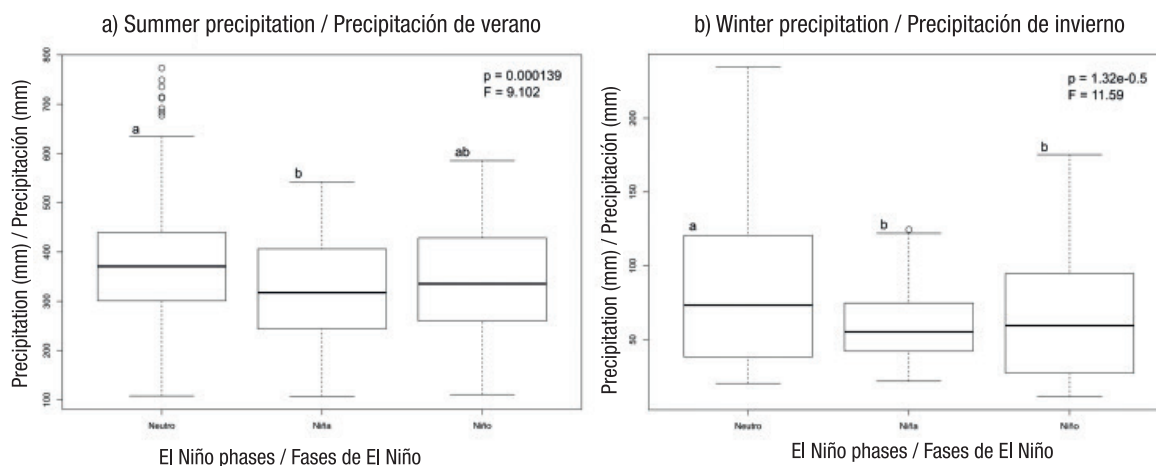
inviernos) correspondientes a las fases El Niño, La Niña o Neutra (Cuadro 1).

Cabe destacar, que es posible que se presenten diferentes fases del fenómeno ENSO durante el mismo año. Ello influye sobre los patrones fenológicos y de productividad de la vegetación (Romo, 2006). Lo anterior se deriva de la respuesta de la vegetación a los pulsos de la precipitación de zonas áridas (Noy-Meir, 1973). Tomando en cuenta lo anterior, las diferentes estaciones se separaron para llevar a cabo el análisis de comparación entre tipos de vegetación.

#### Diferencias de precipitación entre las fases El Niño, La Niña y Neutra

Con el fin de apreciar diferencias de la cantidad de precipitación entre las diversas fases del ENSO, fue realizado un análisis de varianza. En ambas estaciones invierno y verano, los resultados sugieren diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) de precipitación acumulada entre fases del ENSO (Figura 4). Lo anterior concuerda con estudios previos generados para la región (e. g. Reyes y Mejía-Trejo, 1991; Woodhouse, 1997). Esto sugiere que la productividad de la vegetación es influenciada por la fase del ENSO, ya que la humedad es considerada factor importante para la actividad biológica/fenológica en zonas áridas.

Con el objetivo de entender mejor a que corresponden las diferencias significativas mencionadas, se realizaron pruebas *post hoc* de Tukey (Miller, 1966). Los resultados



**Figure 4. Differences in cumulative precipitation in the summer ( $F_{2, 357} = 9.102$ ,  $P < 0.001$ ) and winter ( $F_{2, 357} = 11.59$ ,  $P < 0.001$ ) periods between El Niño Southern Oscillation phases.**

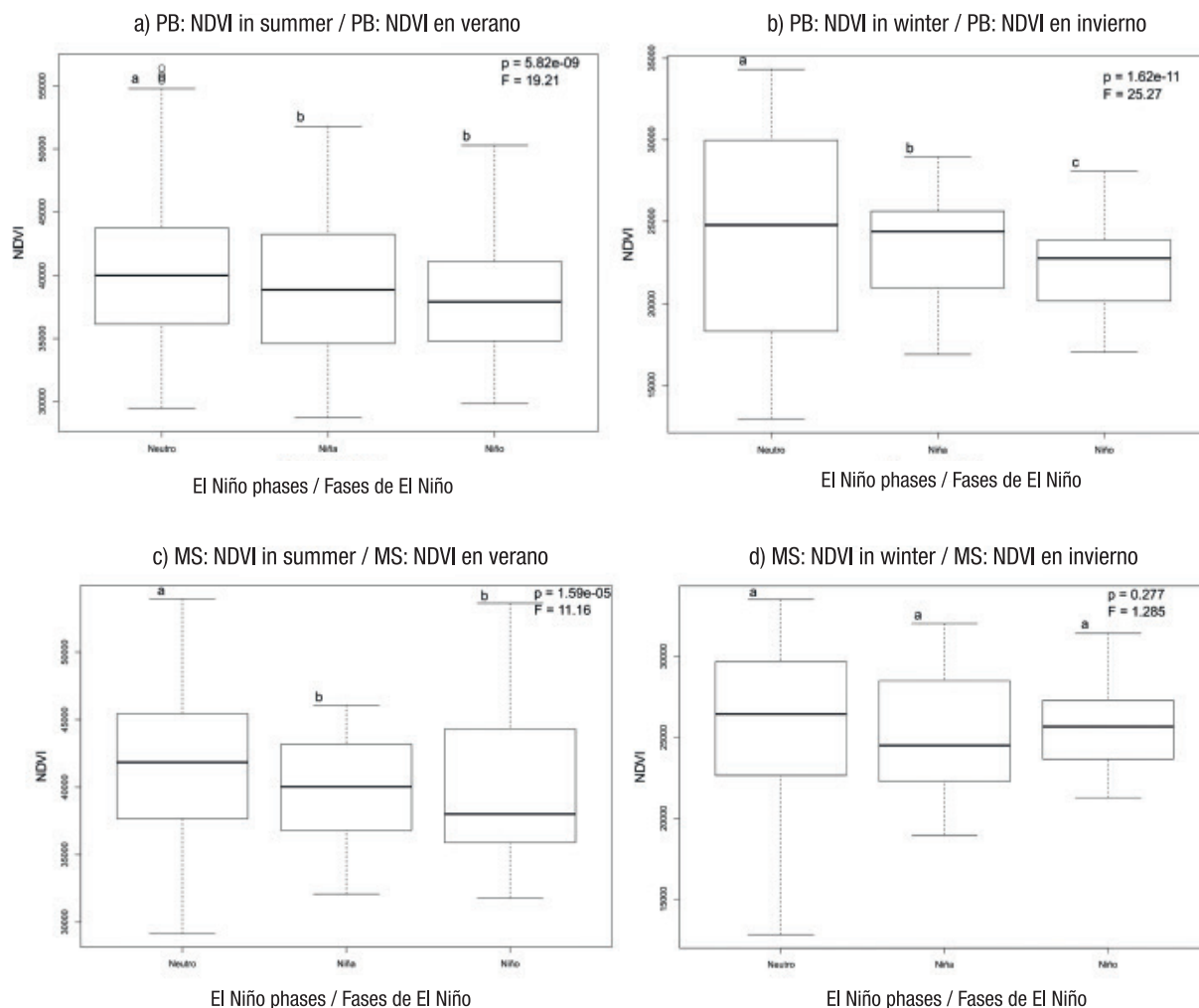
**Figura 4. Diferencias de precipitación acumulada en los periodos verano ( $F_{2, 357} = 9.102$ ,  $P < 0.001$ ) e invierno ( $F_{2, 357} = 11.59$ ,  $P < 0.001$ ) entre fases de El Niño Oscilación del Sur.**

Taking into account the ENSO phases, the results of photosynthetic and productive activity in the two types of vegetation suggest significant differences ( $P < 0.01$ ) between the ENSO phases in the buffel grasslands in the two seasons and only in the summer in the subtropical shrubland sites (Figure 5). Then, the physiology of the species involved in the phenological response of a site is determinant. Specifically, during the summer, in the subtropical shrubland, a higher photosynthetic/productive activity was recorded in the neutral phase ( $F_{2, 1113} = 11.16, P < 0.01$ ). On the other hand, the differences and photosynthetic activity between ENSO phases were non-significant in the subtropical shrubland during winter ( $F_{2, 1113} = 1.285, P > 0.01$ ).

As in the case of the subtropical shrubland, the buffel grassland also showed significantly higher photosynthetic/productive activity during summers

sugieren que, durante el verano, a la fase Neutra se asocia mayor precipitación que en las fases El Niño y La Niña (Figura 4a). También, durante el invierno, a la fase Neutra se vincula mayor cantidad de precipitación que a las fases El Niño o La Niña. Notablemente, a la fase La Niña se asocia mayor cantidad de precipitación que la del El Niño, en invierno, aunque de manera no significativa (Figura 4b).

Algunos investigadores han consignado que, en el Desierto Sonorense, la ocurrencia del fenómeno ENSO en su fase El Niño está asociada con un aumento de la precipitación en las temporadas otoño e invierno (Andrade & Sellers, 1988; Ropelewski & Halpert, 1986; Kiladis & Diaz, 1989; Webb & Betancourt, 1992; Cayan, Redmond, & Riddle, 1999). Sin embargo, en este estudio que comprende el periodo 2001 - 2017 se encontró que la precipitación fue mayor cuando la fase del ENSO no está bien definida (Neutra). Según Philander (1990), una



**Figure 5. NDVI differences in two vegetation types during the summer and winter periods between El Niño Southern Oscillation phases. MS and PB stand for subtropical scrub and buffel grassland, respectively. Figura 5. Diferencias del NDVI en dos tipos de vegetación durante los periodos verano e invierno entre fases de El Niño Oscilación del Sur. MS y PB significan matorral subtropical y pradera de buffel, respectivamente.**

associated with the ENSO neutral phase ( $F_{2, 1455} = 19.21$ ,  $P < 0.01$ ). During winter, the buffel grassland showed notably higher NDVI in neutral phase and lower in El Niño phase ( $F_{2, 1455} = 25.27$ ,  $P < 0.001$ ). It is worth noting that the only significant difference in NDVI between the El Niño and La Niña phases corresponds to the buffel grassland in winter.

Being an arid-semiarid zone, and according to what previous works suggest (Reynolds, Kemp, & Fernandez, 2004), precipitation is the factor that determines the productivity of both types of ecosystems. Thus, during the summer seasons with a neutral ENSO phase, it can be observed that NDVI values in both types of vegetation are significantly higher than in the cases of La Niña or El Niño. This suggests that the distribution of precipitation over time is a limiting factor for the primary production of the ecosystem (Reynolds et al., 2004; Reynolds et al., 2011).

#### Analysis of photosynthetic and productive activity among vegetation types

In order to weight the differences in the productive response between the two types of vegetation analyzed, t-tests were performed to compare the magnitudes of NDVI associated with ENSO phases by season. The results show that, in all ENSO phases (Table 2) in both seasons, except in La Niña-dominated summers, productive activity is significantly higher ( $P < 0.01$ ) in subtropical shrublands than in induced buffel grassland. Therefore, buffel grassland is less productive than subtropical shrublands if net photosynthetic activity is taken into account as a

de las causas que generan inconsistencias en los efectos del ENSO, es que las fases de ENSO varían en magnitud, cobertura espacial, inicio y duración. Lo anterior debe considerarse en investigaciones futuras con el fin de determinar el comportamiento de la precipitación en función de los diversos factores meteorológicos y orográficos que influyen sobre ella.

#### Variación del NDVI asociada a patrones climáticos

Tomando en cuenta las fases de ENSO, los resultados de actividad fotosintética y productiva en los dos tipos de vegetación sugieren diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) entre las fases del ENSO en las praderas de buffel en las dos temporadas y solo en el verano en los sitios de matorral subtropical (Figura 5). Entonces, la fisiología de las especies involucradas en la respuesta fenológica de un sitio es determinante. Específicamente, durante el verano, en el matorral subtropical se registró una mayor actividad fotosintética/productiva en la fase neutra ( $F_{2, 1113} = 11.16$ ,  $P < 0.01$ ). Por otro lado, las diferencias y la actividad fotosintética entre las fases del ENSO fueron no significativas en el matorral subtropical durante el invierno ( $F_{2, 1113} = 1.285$ ,  $P > 0.01$ ).

Al igual que en el caso del matorral subtropical, la pradera de buffel también presenta actividad fotosintética/productiva significativamente mayor durante los veranos asociados a la fase neutra del ENSO ( $F_{2, 1455} = 19.21$ ,  $P < 0.01$ ). Durante el invierno, la pradera de buffel mostró notablemente mayor NDVI en fase neutra y menor en fase El Niño ( $F_{2, 1455} = 25.27$ ,  $P < 0.001$ ). Merece señalar que la única diferencia

**Table 2. Results of the t-test to compare the means of the sum of NDVI of the buffel grass prairie with those of the desert shrubland in different phases of ENSO in the summer and winter seasons.**

**Cuadro 2. Resultados de la prueba de t para comparar las medias de la sumatoria de NDVI de la pradera de zacate buffel con las de matorral desértico en diferentes fases del ENSO en las estaciones verano e invierno.**

Season/Estación	Phase/Fase	t	p	Media Buffel grass prairie/ Media Pradera de Buffel	Media Subtropical Shrub/ Media Matorral Subtropical
Summer/Verano	Niño	3.5931	<0.01	38856.15	40463.21
	Niña	1.0548	0.29	39552.44	39957.52
	Neutral	3.021	<0.01	40768.6	41708.2
Winter/Invierno	Niño	19.912	<0.01	22324.14	25484.18
	Niña	9.7176	<0.01	24337.66	26217.33
	Neutral	2.6525	<0.01	24411.8	25521.76

proxy for net productivity (Castellanos et al., 2013; Cornejo et al., 2018).

This is in agreement with the results of previous studies, because they suggest that buffel grass pastures have lower productivity than native ecosystems in the Sonoran Desert (Nagler, Glenn, Franklin, Lampkin & Huete, 2009). However, buffel grass prairies represent a management decision related to biomass distribution in ecosystems as an alternative to pasture development for cattle ranching in Sonora (Ibarra-Flores et al., 2005; Lyons, Moldonado-Leal & Owen, 2009; Franklin & Molina-Freaner, 2010). Then, the exchange/favoring of ecosystem services related to pasture production has effects on native desert ecosystems, in the short and medium term (Burquez-Montijo et al., 2002; Castellanos et al., 2010; Marshall, 2011; Hinojo-Hinojo et al., 2019).

## Conclusions

The various phases of ENSO have a significant effect on the amount of precipitation during the rainy seasons that occur in the Central Sonora Region. However, due to the variability of the ENSO phenomenon, it is necessary to continue observing how these phases modify the amount of precipitation in different regions of the Sonoran Desert.

The results suggest that precipitation determines the amount of photosynthetic and productive activity in both buffel grasslands and subtropical shrublands in Central Sonora.

The amount of photosynthetic activity/productivity in subtropical shrublands, in the sites involved, is generally higher than in induced buffel grasslands. This suggests that the change in land use and land cover, to implement buffel grasslands, is due to the management preference of both types of vegetation for livestock use.

## Acknowledgments

Sofía Choza Farías thanks CONACYT and the Biosciences Graduate Program of the Universidad de Sonora for their support in the form of a scholarship for her Master's studies, as well as the support of the Ecosystems and Remote Sensing Laboratory for the support received during the present study. Likewise, José Raúl Romo León and Alejandro E. Castellanos Villegas, thank CONACYT for their support through projects CB61865 and CB223525. José Raúl Romo León thanks the Northern Jaguar Project for their support through the project registered as USO313007014. All authors thank Mr. Luis Sierra Maldonado (Rancho el Churi) for allowing us to conduct this study on his

significativa de NDVI entre las fases El Niño y La Niña corresponde a la pradera buffel en invierno.

Al ser una zona árida-semiárida, y de acuerdo con lo que sugieren trabajos previos (Reynolds, Kemp, & Fernandez, 2004), la precipitación es el factor que determina la productividad de ambos tipos de ecosistema. Así, durante las temporadas de verano con fase Neutra del ENSO se puede observar que los valores de NDVI en ambos tipos de vegetación son significativamente mayores que en los casos de La Niña o El Niño. Esto sugiere que la distribución de la precipitación en el tiempo resulta ser un factor limitante para la producción primaria del ecosistema (Reynolds et al., 2004; Reynolds et al., 2011).

## Análisis de la actividad fotosintética y productiva entre tipos de vegetación

Con el fin de ponderar las diferencias en la respuesta productiva entre los dos tipos de vegetación analizados, se realizaron pruebas de t para comparar las magnitudes del NDVI asociadas a las fases de ENSO por estación. Los resultados muestran que, en todas las fases de ENSO (Cuadro 2) en ambas estaciones, excepto en los veranos con predominancia de La Niña, la actividad productiva es significativamente mayor ( $P < 0.01$ ) en los matorrales subtropicales que en las praderas inducidas de buffel. Por consiguiente, la pradera de buffel es menos productiva que los matorrales subtropicales si se toma en cuenta la actividad fotosintética neta como un proxy de productividad neta (Castellanos et al., 2013; Cornejo et al., 2018).

Lo anterior concuerda con los resultados de trabajos previos, porque sugieren que las praderas de buffel tienen productividad menor que los ecosistemas nativos del Desierto Sonorense (Nagler, Glenn, Franklin, Lampkin & Huete, 2009). Sin embargo, las praderas de zacate buffel representan una decisión de manejo relacionada con la distribución de biomasa en los ecosistemas como alternativa al desarrollo de pasturas para la ganadería en Sonora (Ibarra-Flores et al., 2005; Lyons, Moldonado-Leal & Owen, 2009; Franklin & Molina-Freaner, 2010). Entonces, el intercambio/favorecimiento de servicios ecosistémicos relacionados con la producción de pastos tiene efectos sobre los ecosistemas nativos del desierto, a corto y mediano plazos (Burquez-Montijo et al., 2002; Castellanos et al., 2010; Marshall, 2011; Hinojo-Hinojo et al., 2019).

## Conclusiones

Las diversas fases de ENSO tienen efecto significativo sobre la cantidad de precipitación durante las temporadas de lluvia que se presentan en la Región Central de Sonora. Sin embargo, debido a la variabilidad

property.

### End of English version

### References / Referencias

- Andrade, E. R., & Sellers, W. D. (1988). El Niño and its effect on precipitation in Arizona. *Journal of Climatology*, 8, 403-410.
- Bowers, J. E. (2005). El Niño and displays of spring-flowering annuals in the Mojave and Sonoran deserts. *Journal of The Torrey Botanical Society*, 132, 38-49.
- Bravo-Peña, L. C., Doode-Matsumoto, S., Castellanos-Villegas, A. E., & Espejel-Carbajal, I. (2010). Políticas rurales y pérdida de cobertura vegetal. Elementos para reformular instrumentos de fomento agropecuario relacionados con la apertura de praderas ganaderas. *Región y Sociedad*, 22, 3-35.
- Bravo, L. C., & Castellanos V. A. E. (2013). Tendencias del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI) en el estado de Sonora. Implicaciones potenciales sobre el sector pecuario en el contexto del cambio climático. Pp. 285-323. En: Sánchez-Flores, E. y R. E. Díaz-Caravantes. Eds. *Dinámicas Locales del Cambio Global. Aplicaciones de Percepción Remota y Análisis Espacial en la Evaluación del Uso del Territorio*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Cd. Juárez. 547 p.
- Brooks, M. L., D'Antonio, C. M., Richardson, D. M., Grace, J. B., Keeley, J. E.,..., Pyke, D. (2004). Effects of Invasive Alien Plants on Fire Regimes. *BioScience*, 54, 677-688.
- Burquez-Montijo, A., Miller, M., & Martínez-Yrizar, A. (2002). Mexican grasslands, thornshrub, and the transformation of the Sonoran Desert by invasive exotic buffelgrass (*Pennisetum ciliare*). In: Tellman, B. (Eds.), *Invasive Exotic Species in the Sonoran Region* (pp. 126-146). The University of Arizona Press and The Arizona-Sonora Desert Museum, Tucson, Arizona.
- Bustamante-Icedo, A. K., Romo-Leon, J. R., Castellanos-Villegas, A. E., Mendez-Estrella, R., & Gandarilla-Aizpuro, F. J. (2019). Análisis espacial del cambio de cobertura/uso del suelo asociado a pastos exóticos en la Sierra Libre, Sonora. *Biocencia*, 21, 79-86.
- Castellanos, A. E., Yanes, G., & Valdez-Zamudio, D. (2002). Drought-tolerant exotic buffel-grass and desertification. In: Weeds Across Borders, Tellman B (Eds.), *Arizona-Sonora Desert Museum*. Tucson, Arizona.
- Castellanos, A., Bravo, L., Koch, G., Llano, J., López, D., Méndez, R.,..., Yañes, G. (2010). Impactos ecológicos por el uso del terreno en el funcionamiento de ecosistemas áridos y semiáridos. En: *Diversidad biológica de Sonora* (pp. 157-186) Editores: Molina Freaner y Van Devender. UNAM. CONABIO.
- Castellanos, A. E., Celaya, H., Hinojo, C., Ibarra, A., & Romo, J. R. (2013). Biodiversity effects on ecosystem function due to land use: The case of buffel savannas in the Sky Islands Seas in the central region of Sonora. En:

que presenta el fenómeno ENSO, lo necesario es continuar observando cómo estas fases modifican la cantidad de precipitación en distintas regiones del Desierto Sonorense.

Los resultados sugieren que la precipitación determina la cantidad de actividad fotosintética y productiva que presentan tanto las praderas de buffel, como los matorrales subtropicales en la Región Central de Sonora.

La cantidad de actividad fotosintética/productividad en los matorrales subtropicales, en los sitios involucrados, es generalmente mayor que en las praderas inducidas de buffel. Lo anterior sugiere que el cambio de uso y cobertura de suelo, para implementar praderas de buffel, obedece a la preferencia de manejo de ambos tipos de vegetación con uso ganadero.

### Agradecimientos

Sofía Choza Farías agradece al CONACYT y al Posgrado en Biociencias de la Universidad de Sonora, por el apoyo en forma de beca para estudios de Maestría, así como el apoyo del Laboratorio de Ecosistemas y Percepción Remota, por el apoyo recibido durante el presente estudio. Asimismo, José Raúl Romo León y Alejandro E. Castellanos Villegas, agradecen el apoyo de CONACYT a través de los proyectos CB61865 y CB223525. José Raúl Romo León agradece el apoyo de la Northern Jaguar Project, por el apoyo por parte del proyecto registrado como USO313007014. Todos los autores agradecen al Sr. Luis Sierra Maldonado (Rancho el Churi), por permitirnos realizar este estudio dentro de su propiedad.

### Fin de la versión es español

- Gottfried, Gerald J., Ffolliott, Peter F., Gebow, Brooke S., Eskew, Lane G., Collins, Loa C. (Eds.). *Merging science and management in a rapidly changing world: Biodiversity and management of the Madrean Archipelago III and 7th Conference on Research and Resource Management in the Southwestern Deserts* (pp 191-196). Tucson, Arizona.
- Cayan, D. R., Redmond, K. T., & Riddle, L. G. (1999). ENSO and hydrologic extremes in the western United States. *Journal of Climate*, 12, 2881-2893.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R.D., Arreola-Ávila, J., & Constante-García, V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 207-215.
- Challen Ger, A., & J. Soberón. (2008). Los ecosistemas terrestres. En *Capital natural de México*, vol. I:

- Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 87-108.
- Cornejo-Denman, L. A., Romo-Leon J. R., Castellanos-Villegas, A. E., Diaz-Caravantes, R. E., Moreno-Vázquez, J. L., & Méndez-Estrella, R. (2018). Assessing Riparian Vegetation Condition and Function in Disturbed Sites of the Arid Northwestern Mexico. *Land*, 7, 13. <https://doi.org/10.3390/land7010013>.
- Crimmins, T. M., Crimmins, M. A., & Bertelsen, C. D. (2010). Complex responses to climate drivers in onset of spring flowering across a semi-arid elevation gradient. *Journal of Ecology*, 98, 1042–1051.
- De la Casa, A., & Ovando, G. (2006). The influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) episodes on rainfall and corn yields in Córdoba Province, Argentina. *Agricultura Técnica*. 66.
- Fedorov, A. V., & Philander, S. G. (2000). Is El Niño changing? *Science*, 288, 1997- 2002.
- Fensholt, R. (2004). Earth observation of vegetation status in the Sahelian and Sudanian West Africa: comparison of Terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 1641-1659.
- Franklin, K., & Molina-Freaner, F. (2010). Consequences of Buffelgrass Pasture Development for Primary Productivity, Perennial Plant Richness, and Vegetation Structure in the Drylands of Sonora, Mexico. *Conservation Biology*, 24, 1664–1673.
- Hinojo-Hinojo, C., Castellanos, A. E., Rodríguez, J. C., Delgado-Balbuena, J., Romo-León, J. R., Celaya-Michel, H., & Huxman, T. E. (2016). Carbon and water fluxes in an exotic buffelgrass savanna. *Rangeland Ecology & Management*, 69, 334-341.
- Hinojo-Hinojo, C., Castellanos, A. E., Huxman, T., Rodríguez, J. C., Vargas, R., Romo-León, J. R., & Biederman, J. (2019). Native shrubland and managed buffelgrass savanna in drylands: Implications for ecosystem carbon and water fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 269-278.
- Holmgren, M., & Scheffer, M. (2001). El Niño as a window of opportunity for the restoration of degraded arid ecosystems. *Ecosystems*, 4, 151–159.
- Holmgren, M., Stapp, P., Dickman, C. R., Gracia, C., Graham, S., Gutiérrez, J. R.,..., Yañes, G., (2010). Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, 87-95.
- Ibarra-Flores, F., Moreno Medina, S., Martín, M. H., Denogean Ballesteros, F., & Gerlach Barrera, L. E. (2005). La siembra de zacate buffel como una alternativa para incrementar la rentabilidad de los ranchos ganaderos de la sierra de Sonora. *Técnica Pecuaria en México*, 43, 173-183.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective*. Third edition. Prentice-Hall Inc. Estados Unidos.
- Johnson, G. D., & Navarro C. (1992). Zacate buffel y biodiversidad en el desierto sonorense. *Fomento Ganadero*. Secretaría de Fomento Ganadero del Gobierno del Estado de Sonora, 36, 5-7.
- Kiladis, G. N., & Diaz, H. (1989). Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2, 1069–1090.
- Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., & J. Simpson. (1998). The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, 809–816.
- Lyons, K. G., Moldonado-Leal, B. G., & Owen, G. (2009). Community and Ecosystem Impacts of the Non-Indigenous C4 Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) in the Sonoran Desert, Sonora, Mexico. En: Van Devender, T. R., Espinosa-García, F. J., Harper-Lore, B. L., y Hubbard, T. (Eds.), *Invasive Plants on the Move: Controlling them in North America* (pp 251-264). Arizona-Sonora Desert Museum Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The Midsummer drought over México and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577-1578.
- Magaña, V., & Conde, C. (2003). Climate variability and climate change and their impacts on the freshwater resources in the border region: A case study for Sonora, Mexico. *Climate and Water-Transboundary Challenges in the Americas*, H. F. Díaz and B. S. Morehouse, (Eds.), *Kluwer Academic Publishers*, (pp 373–393).
- Marshall, N. A. (2011). Considering the social dimension of invasive species: the case of buffel grass. *Environmental Science and Policy*, 14, 327-338.
- Mendez-Estrella, R., Romo-Leon, J. R., Castellanos, A. E., Gandarilla-Aizpuro, F. J., & Hartfield, K. (2016). Analyzing landscape trends on agriculture, introduced exotic grasslands and riparian ecosystems in arid regions of Mexico. *Remote Sensing*, 8, 664.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Miller, R. G. (1966). *Simultaneous Statistical Inference*. McGraw-Hill. New York, NY, Estados Unidos de América.
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García O., F., García S., F.,..., Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34, 39-59.
- Nagler, P. L., Glenn, E. P., Franklin, K. A., Lampkin, D. & Huete, A. R. (2009). Remote sensing methods to monitor buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) and native ecosystem productivity in the plains of Sonora, Mexico. pp. 265-74. En: Van Devender, T. R., Espinosa-García, F. J., Harper-Lore, B. L. and Hubbard, T. (Eds.). *Invasive plants on the move: Controlling them in North America*, University of Arizona Press, Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- NASA, MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. (2018). (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2018). National Weather Service: Climate Prediction Center. College Park, Maryland, USA: Cold & Warm

- Episodes by Season.
- Noy-Meir, I. (1973). Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 23-51.
- O'Hara, S. L., Street-Perrot, F. A., & Burt, T. P. (1993). Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture. *Nature*, 362, 48-51.
- ORNL DAAC. (2017). MODIS Collection 6 Land Product Subsets Web Service. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1557>
- Philander, S. G. (1990). El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. *Academic Press*, San Diego, California, Estados Unidos de América.
- Pontifes, P. A., García-Meneses, P. M., Gómez-Aíza, L., Monterroso-Rivas, A. I., & Caso-Chávez, M. (2018). Land use/land cover change and extreme climatic events in the arid and semi-arid ecoregions of Mexico. *Atmósfera*, 31, 355-372.
- Quinn, W. H., Neal, W. T. & Antunez de Mayolo, S. E. (1987). El Niño occurrences over the past four-and-a-half centuries. *Journal of Geophysical*, 92, 14449-14461.
- Ramírez, R. (1999). Feed resources and feeding techniques of small ruminants under extensive management conditions. *Small Ruminant Research*, 34, 215-230.
- Ramirez, R., Foroughbackhch, R., Haud, L., Alba-Avila, J., Garcia-Castillo, C., & Espinosa-Vasquez, E. (2001). Seasonal dynamics of dry matter, crude protein and cell wall digestion in total plant, leaves and stems of common buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*). *Journal of Applied Animal Research*, 19, 209-218.
- Reyes, S., & Mejía-Trejo, A. (1991): Tropical perturbations in the eastern Pacific and the precipitation field over northwestern Mexico in relation to the ENSO phenomenon. *International Journal of Climatology*, 11, 515-528.
- Reynolds J. F., Kemp P. R., Ogle K., & Fernandez R. J. (2004). Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 141, 194-210.
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J.,..., Walker, B. (2007). Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 316, 847-851.
- Reynolds, J. F., Grainger, A., Stafford Smith, D. M., Bastin, G., Garcia-Barríos, L., Fernandez, R. J.,..., Zdruli, P. (2011). Scientific concepts for an integrated analysis of desertification. *Land Degradation & Development*, 22, 166-183.
- Ropelewski, C. F. & Halpert, M. S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the ENSO. *Monthly Weather Review*, 114, 2352-2362.
- Romo-Leon, J. R. (2006). Conservation and the changing pattern of land cover and land use in central Sonora, Mexico. In: *Environmental Sciences and Policy* (pp 103). Northern Arizona University, Flagstaff, Arizona.
- Romo-León, J. R., W. J. D. van Leeuwen, A. & Castellanos. (2013). Percepción remota para el análisis de la distribución y cambios de uso de suelo en zonas áridas y semiáridas. pp.17-48. En: Sánchez-Flores, E. y R. E. Díaz-Caravantes. Eds. *Dinámicas Locales del Cambio Global. Aplicaciones de Percepción Remota y Análisis Espacial en la Evaluación del Uso del Territorio*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Cd. Juárez. 547 pp.
- Romo-Leon, J. R., Van Leeuwen, W. & Castellanos-Villegas, A. E. (2014). Using remote sensing tools to assess land use transitions in unsustainable arid agro-ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 106, 27-35.
- Sanderson, M., Voight, P., & Jones, R. (1999). Yield and quality of warm-season grasses in central Texas. *Journal of Range Management*, 52, 45-150.
- Salinas-Zavala, C. A., Douglas, A. V., & Diaz, H. F. (2002). Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sensing of Environment*, 82, 417-430,
- Shreve, F. & Wiggins, I. L. (1964). *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. Stanford University Press, California.
- Sivakumar, M. V. K. (2007). Interactions between climate and desertification. *Agric. For. Meteorol.* 142, 143-155.
- Tarpley, J., Schneider, S. & Money, R. (1984). Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 23, 491-494.
- Turner R. M., Bowers, J. E. & Burgess, T. L. (1995). *Sonoran Desert Plants. An Ecological Atlas*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Valdez-Zamudio, D., Castellanos Villegas, A. & Marsh, S. E. (2000). Land Cover Changes in Central Sonora, Mexico. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-13, 349-351.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. & Melillo, J. M. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277, 494-500.
- Webb, R. H. & Betancourt, J. L. (1992). Climatic variability and flood frequency of the Santa Cruz River, Pima County, Arizona. US. *Geological Survey, Water-Supply Paper* 2379, 40.
- Woodhouse, C. A. (1997). Winter climate and atmospheric circulation patterns in the Sonoran Desert region, USA. *International Journal of Climatology*, 17, 859-873.
- Zolotokrilyn, A., Titkova, T., & Brito-Castillo, L. (2016). Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from, 2000-2015. *Journal of Arid Environments*, 134, 21-32.