



Dinámica estacional de pasto banderita [*Bouteloua curtipendula* (Mich.) Torr.] en Chihuahua, México: enfoque geoestadístico



Ireyli Zuluamy Iracheta-Lara ^a

Carlos Raúl Morales-Nieto ^{b*}

Gerardo Méndez-Zamora ^c

Jaime Neftalí Márquez-Godoy ^d

Federico Villarreal-Guerrero ^b

^a Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Campus 1, Av. Pascual Orozco SN, 31350 Chihuahua, Chihuahua, México.

^b Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Zootecnia y Ecología, Periférico R. Almada km 1. 31000 Chihuahua, Chihuahua, México.

^c Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. General Escobedo, Nuevo León, México.

^d Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Valle de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: cnieto@uach.mx

Resumen:

Los datos fenológicos observados en tierra, junto con datos satelitales, son herramientas cruciales para identificar la estación de crecimiento de la vegetación. Utilizando un enfoque geoestadístico, este estudio tuvo como objetivo determinar la dinámica estacional del pasto banderita [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.] en Chihuahua y su relación con la variabilidad climática. Se calcularon las métricas del inicio (SOS) y del final (EOS) de la temporada de crecimiento de esta especie en el estado de Chihuahua. Además, se evaluó el

efecto de la temperatura del aire y la precipitación en la dinámica del SOS y el EOS durante los periodos 2000-2010 y 2011-2019. Los tratamientos consideraron las tres regiones ecológicas (desierto, valles centrales y sierra) y los años de registro. El estado se estudió a través de tres zonas ecológicas: desierto (D), valles centrales (CV) y sierra (S) para su comparación. El SOS y el EOS del pasto banderita en cada zona se definieron anualmente a partir de datos Landsat durante el periodo 2000-2019, basándose en la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El SOS osciló entre mayo y junio (promedio de día juliano [doy]=174), mientras que el EOS osciló entre octubre y noviembre (promedio de día juliano [doy]=283). Se observó un retraso en el SOS en la zona D; el retraso en el crecimiento del pasto banderita en la estación primaveral puede deberse a una relativa escasez de agua, aunque la mayor temperatura en primavera facilita el cumplimiento de los requisitos térmicos para el crecimiento de la especie. Estos hallazgos sugieren que la variabilidad climática tiene un impacto significativo en la dinámica estacional del pasto banderita, lo que puede influir en las estrategias de manejo de estos ecosistemas.

Palabras clave: Geomática, Variabilidad ambiental, NDVI, Chihuahua.

Recibido: 12/09/2022

Aceptado: 30/07/2024

Introducción

La variabilidad climática, incluyendo cambios en la temperatura del aire y las precipitaciones, tiene un impacto significativo en la dinámica estacional de la vegetación. La dinámica estacional se refiere a los cambios periódicos en los procesos biológicos de las plantas a lo largo del año, influenciados por factores ambientales⁽¹⁾. Estudios recientes han demostrado que la variabilidad en las precipitaciones y las temperaturas pueden alterar significativamente los patrones de crecimiento y senescencia de las plantas^(2,3). Se subraya cómo el aumento de la temperatura global y la disminución de las precipitaciones⁽⁴⁾ ha llevado a una extensión de la temporada de crecimiento en diversas regiones, destacando la necesidad de adaptar las prácticas agrícolas a estas nuevas condiciones^(5,6).

Para el seguimiento de la vegetación, las metodologías habituales incluyen el registro de datos terrestres a nivel de especie para realizar análisis específicos de las plantas a escala local⁽⁷⁾. A nivel regional y global, los datos satelitales se utilizan para definir características y periodos de la vegetación o de los paisajes^(8,9). Tanto los datos fenológicos *in situ* como los obtenidos por satélite se utilizan habitualmente para identificar la fase de crecimiento de la vegetación a diferentes escalas. Se han desarrollado varios índices de vegetación derivados

de satélites, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI), para extraer parámetros fenológicos de la vegetación^(10,11). El uso de los índices mencionados se ha centrado en el análisis de las diferencias espacio-temporales de los fenómenos fenológicos entre diversos biomas o zonas geográficas^(12,13).

En el estado de Chihuahua, los pastizales, incluido el pasto banderita [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.], son fundamentales para la provisión de recursos para la ganadería y la estabilidad ecológica de la región. Investigaciones han demostrado que los cambios en los patrones, como el tiempo de floración y fructificación, son señales tempranas de los efectos de la variabilidad climática⁽¹⁴⁾. Por el contrario, en lugares donde los eventos de lluvia consecutivos ocurren esporádicamente, el aumento de la temperatura puede no tener efectos significativos en la fenología primaveral^(15,16). El aumento de las precipitaciones no ha mostrado efectos significativos en el desencadenamiento de la fase de floración en pastizales⁽¹⁷⁾, mientras que la reducción de las precipitaciones indujo un crecimiento y una floración más tempranos de las especies herbáceas en experimentos de campo⁽¹⁸⁾. Por lo tanto, el estudio de la fenología y sus relaciones con los factores climáticos serviría para adoptar estrategias adecuadas para las actividades de pastoreo, con vistas al uso sostenible de los pastizales.

En Chihuahua, la precipitación durante el 2011 fue de sólo 156 mm, lo que representa un tercio del promedio anual (es decir, 470 mm), causando enormes pérdidas económicas. Además, los eventos de heladas registrados durante el mismo periodo en el estado no fueron típicos. Estos eventos destruyeron los pastos y causaron la muerte de más de 300,000 bovinos^(19,20). Los objetivos de esta investigación fueron analizar las métricas fenológicas del inicio (SOS) y del final (EOS) de la temporada de crecimiento durante 2000-2010 y 2011-2019, que son períodos anteriores y posteriores a 2011. Los objetivos adicionales incluyeron determinar qué factor climático está involucrado en la dinámica del SOS e identificar posibles tendencias de cambio en el SOS, así como en el EOS, durante los períodos de 2000-2010 y 2011-2019. Esto permitirá evaluar si un fenómeno perturbador determina o altera las dinámicas estacionales e incide en los períodos de crecimiento de los pastizales, proporcionando información vital para su gestión sostenible en la región.

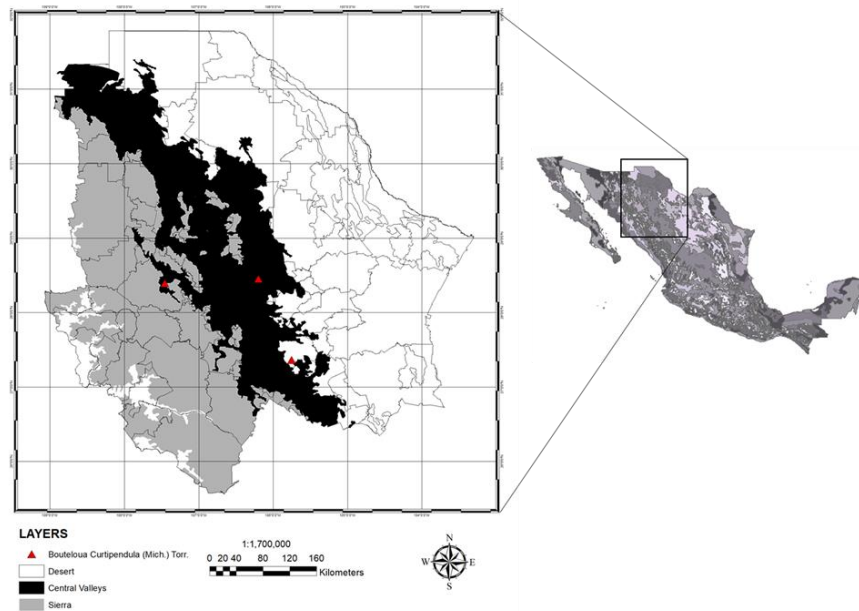
Material y métodos

Área de estudio

Para la organización de la información se decidió clasificar el estado de Chihuahua en zonas ecológicas: Desierto (D), Valles Centrales (CV) y Sierra (S) de acuerdo a las condiciones climáticas que presentan (Figura 1). La zona D tiene un clima seco y semicálido, con temperaturas máximas diarias de 40 °C o superiores en el verano y temperaturas mínimas

diarias de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menores en invierno. Por otra parte, la zona CV, tiene un clima templado de semidesértico a subhúmedo, en invierno con temperaturas mínimas diarias de hasta $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, comúnmente las temperaturas mínimas más extremas del estado. La precipitación anual oscila entre 300 y 550 mm en esta zona. Finalmente, la S tiene un clima con verano húmedo de semifrío a templado e invierno con nevadas. Las temperaturas mínimas pueden descender hasta $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que las máximas pueden alcanzar los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. El clima responde entre otros factores a la altura sobre el nivel del mar que en promedio está a 2,400 m, llanuras rodeadas por picos que con 200 a 1,000 m por arriba del piso de la llanura⁽²¹⁾.

Figura 1: Área de estudio



Recolección de datos

Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron de CONAGUA⁽²²⁾ para el periodo del 2000 al 2019. Por otra parte, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) se calculó a partir de escenas obtenidas del Landsat ETM+7 y Landsat OLI8 (<https://glovis.usgs.gov/>). Además, 196 registros verificados de la presencia del pasto banderita [*Bouteloua curtispendula* (Michx.) Torr.] en cada una de las tres regiones ecológicas en que se dividió el estado.

El cálculo del NDVI (ecuación 1) se realizó en la plataforma Google Earth Engine (<http://earthengine.google.com/>). Se obtuvo información de escenas de cada 16 días para el periodo 2000-2019 a una resolución espacial de 30 m (WRS Path/Row 32/34 38/42).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Donde, NDVI es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. NIR y Red son los valores de reflectancia en los rangos infrarrojo cercano y rojo del espectro electromagnético, respectivamente.

El NDVI se obtuvo a partir de compuestos de valores máximos, eligiendo observaciones con mínima cobertura de nubes y vistas cercanas al nadir⁽²³⁾. Se aplicaron correcciones adicionales para gases atmosféricos, nubes y aerosoles⁽²⁴⁾. Se elaboraron series temporales con información valiosa del NDVI. Aunque se seleccionaron las mediciones de reflectancia de mayor calidad, es probable que las mediciones de baja calidad sigan formando parte de las series temporales debido a los períodos nublados. La eliminación de estos valores de baja calidad en las series temporales de NDVI fue de crucial importancia para obtener una métrica fenológica creíble. Por lo general, hay algunos puntos bajos secuenciales que se producen al principio y al final de la serie temporal, así como puntos bajos abruptos y extremos en la mitad del período de crecimiento. En primer lugar, se abordó la cuestión de los puntos abruptos [NDVI (t)] correspondientes a la mitad de la estación; si la diferencia entre el NDVI (t) y el NDVI (t ± 1) era mayor que (NDVImax - NDVImin)/2, entonces el NDVI (t) se sustituyó por la media del NDVI (t - 1) y el NDVI (t+1). A continuación, se suavizó toda la serie temporal con un filtro de media móvil de 9 puntos. Por último, los valores bajos al principio y al final de la serie temporal se sustituyeron por el valor medio del NDVI de marzo, cuando la mayoría de los valores del NDVI son similares al valor del NDVI del suelo desnudo, debido a la limitada presencia de vegetación en la superficie. En este caso, se asumió que los valores de NDVI durante la temporada de no crecimiento son constantes.

Análisis de la función fenológica

La función logística típica recupera la métrica fenológica durante la primavera y el otoño por separado, mientras que la función logística dual puede extraer los eventos fenológicos de primavera y otoño, simultáneamente. En este estudio, se utilizaron las ecuaciones 2 y 3 para obtener el SOS y el EOS, respectivamente⁽²⁵⁾:

$$SOS = \frac{2\ln(\sqrt{3}-\sqrt{2})}{I} + S \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$EOS = \frac{2\ln(\sqrt{3}-\sqrt{2})}{D} + E \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde, SOS y EOS denotan el día del año (doy) del inicio y del final de la estación, I y D representan las máximas pendientes ascendentes y descendentes (puntos de inflexión) en la

curva NDVI ajustada, respectivamente, mientras que S y E representan el doy cuando I y D se producen en la curva NDVI ajustada.

Análisis estadístico

Los datos de SOS y EOS se compararon al inicio y al final del periodo de estudio, en lugar de calcular las tendencias medias de múltiples píxeles de SOS y EOS. Esto se decidió para reducir los errores de cálculo. Para eliminar los efectos de los años anormales en SOS y EOS, se obtuvo primero la media global de SOS y EOS durante 2000-2010 y 2011-2019, por separado para cada serie temporal. Para inferir sobre las posibles causas de las variaciones del SOS y EOS, se obtuvieron registros de temperatura y precipitación de las estaciones meteorológicas más cercanas al punto de muestreo⁽²⁶⁾. Los registros correspondieron a fechas anteriores al SOS y EOS y del periodo 2000-2010 y 2011-2019.

Los datos de SPD y EPD se compararon sus diferencias entre las zonas D, CV y S con un análisis de varianza univariante (ANOVA). Esto se realizó a través de un arreglo factorial 3x2, tres regiones: D, CV y S y dos periodos 2000 a 2010 y 2011 a 2019. De los 196 registros de presencia de pastizales, se seleccionó al azar una coordenada de cada zona ecológica con el fin de realizar una comparación de la vegetación en diferentes áreas y como ésta responde a cambios en las condiciones climáticas (Figura 1). Además, se realizó un análisis de correlación para evaluar la relación entre SPD y EPD con las variables climáticas de cada región y periodo.

Resultados y discusión

Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales medias (precipitación y temperatura) durante el periodo 2000-2019 mostraron que la temperatura primaveral en la zona D donde se analizó el registro del pasto banderita fue mayor que en las zonas CV y S. Mientras tanto, la precipitación de la estación primaveral fue mayor en la zona D que en las zonas CV y S.

Como se ha informado en estudios anteriores, los eventos fenológicos primaverales son particularmente sensibles a la temperatura, y el calentamiento experimentado en las últimas décadas ya ha mostrado efectos sobre la fenología, desencadenando eventos fenológicos primaverales más tempranos y extendiendo el periodo de crecimiento⁽²⁷⁾. En otoño, la zona D también fue más cálida y seca que las zonas CV y S. En las tres zonas ecológicas, el otoño es más fresco y húmedo que la primavera (Cuadro 1). Autores afirmaron⁽²⁸⁾ que el principal factor climático que afecta a la fenología de las plantas es la temperatura. También

informaron de que el aumento de la temperatura del aire afecta a la fenología y puede detectarse fácilmente en los datos fenológicos.

Cuadro 1: Condiciones medioambientales en la Sierra, Valles Centrales y Desierto

Zona ecológica	ST (°C)	SP (mm)	AT (°C)	AP (mm)
Sierra	22.27	48.56	21.6	117.2
Valles Centrales	24.42	64.52	20.7	56.76
Desierto	21.14	20.51	15.02	106.16

ST= temperatura de primavera; SP= precipitación de primavera; AT= temperatura de otoño; AP= precipitación de otoño.

Comparación general del SOS y el EOS entre zonas ecológicas

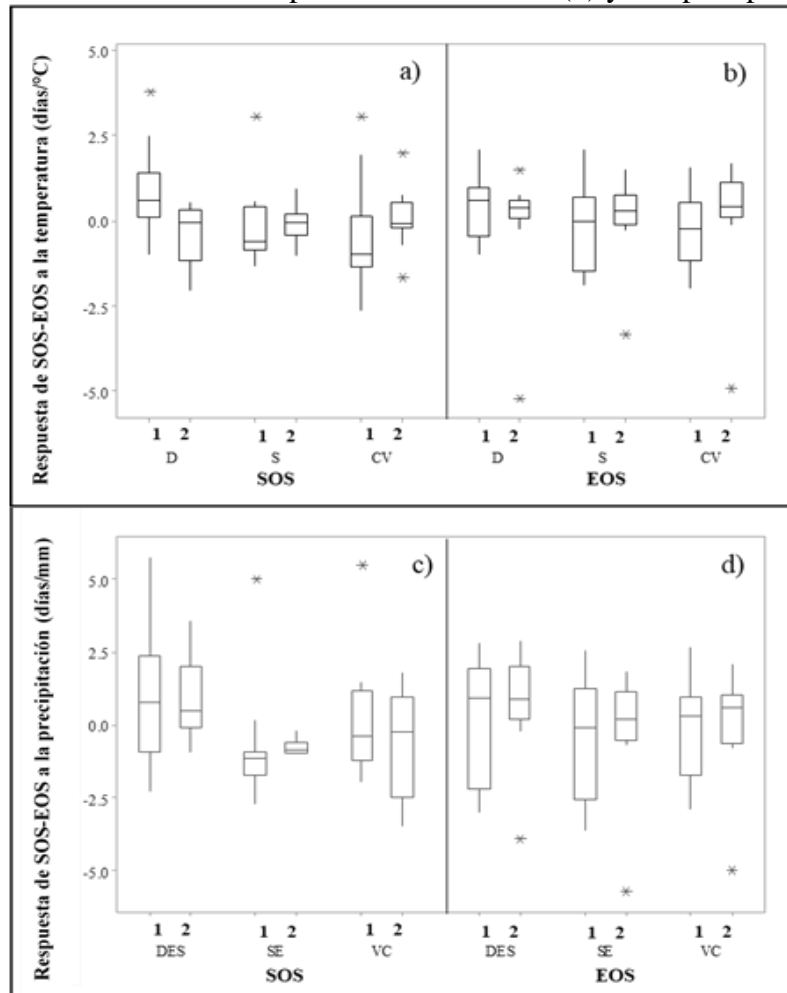
Las medias para SPD y EPD fueron en los días 174 y 283 del año, respectivamente, ubicando estos días en meses serían mayo-junio y octubre. Procurar una redacción más sucinta por ejemplo en la zona D, SPD y EPD ocurrieron en los días 172 y 265 del año, respectivamente, más temprano ($P < 0.05$) en el año en comparación a las otras dos zonas (doy 180 y 286). El SOS se produjo antes en la zona D que en las zonas CV y S. Tanto el SOS como el EOS se produjeron significativamente ($P < 0.05$) antes en la zona D (doy 172 y 265, respectivamente) que en las zonas CV (doy 180 y 286, respectivamente) y D (doy 179 y 297, respectivamente). En cuanto a las fluctuaciones anuales del SOS y el EOS, la desviación estándar (DE) media del EOS (25.47 días) fue mayor que la del SOS (18.53 días). Las mayores DE de SOS y EOS correspondieron a la zona D (21.6 y 25.15 días, respectivamente), en comparación con las zonas CV (19.5 y 25.05 días, respectivamente) y S (11.5 y 12.41 días, respectivamente). Los modelos fenológicos basados en datos satelitales indican la disponibilidad de agua como una condición ambiental determinante en el SPD en praderas norteamericanas⁽⁷⁾; mientras que la temperatura fue determinante para desencadenar eventos fenológicos primaverales en leñosas de ecosistemas templados⁽²⁹⁾ y herbáceas de los ecosistemas alpinos⁽³⁰⁾.

Tasas de respuesta del SOS y el EOS a la temperatura y la precipitación

Aunque se produjo un retraso de 0.33 días para el SOS en la zona D durante 2000-2019, el SOS se produjo 0.20 y 0.09 días antes para las zonas CV y S, respectivamente (Figura 2a). Mientras tanto, la disminución de la precipitación primaveral, que se produjo antes del inicio de la estación, provocó un retraso del SOS de 0.42, 0.24 y 0.32 días mm^{-1} para las zonas D, CV y S, respectivamente (Figura 2b). Para la zona D, la sensibilidad del SOS a la temperatura y la precipitación precedente, que se registraron antes del inicio de la estación, fue significativamente mayor que en las zonas CV y S. En otoño, las temperaturas más cálidas

retrasaron el SOS a tasas de 0.94 y 0.35 días °C⁻¹ para las zonas CV y S, respectivamente, mientras que extendieron el SOS en 0.72 días °C⁻¹ para la zona D (Figura 2c).

Figura 2: Respuesta del SOS a la temperatura antecedente (a) y a la precipitación (c), y tasas de respuesta del SOS debido a la temperatura antecedente (b) y a la precipitación (d) al EOS



1, periodo de 2000-2010; 2, periodo de 2011-2019. D= desierto; S= sierra; CV= valles centrales.

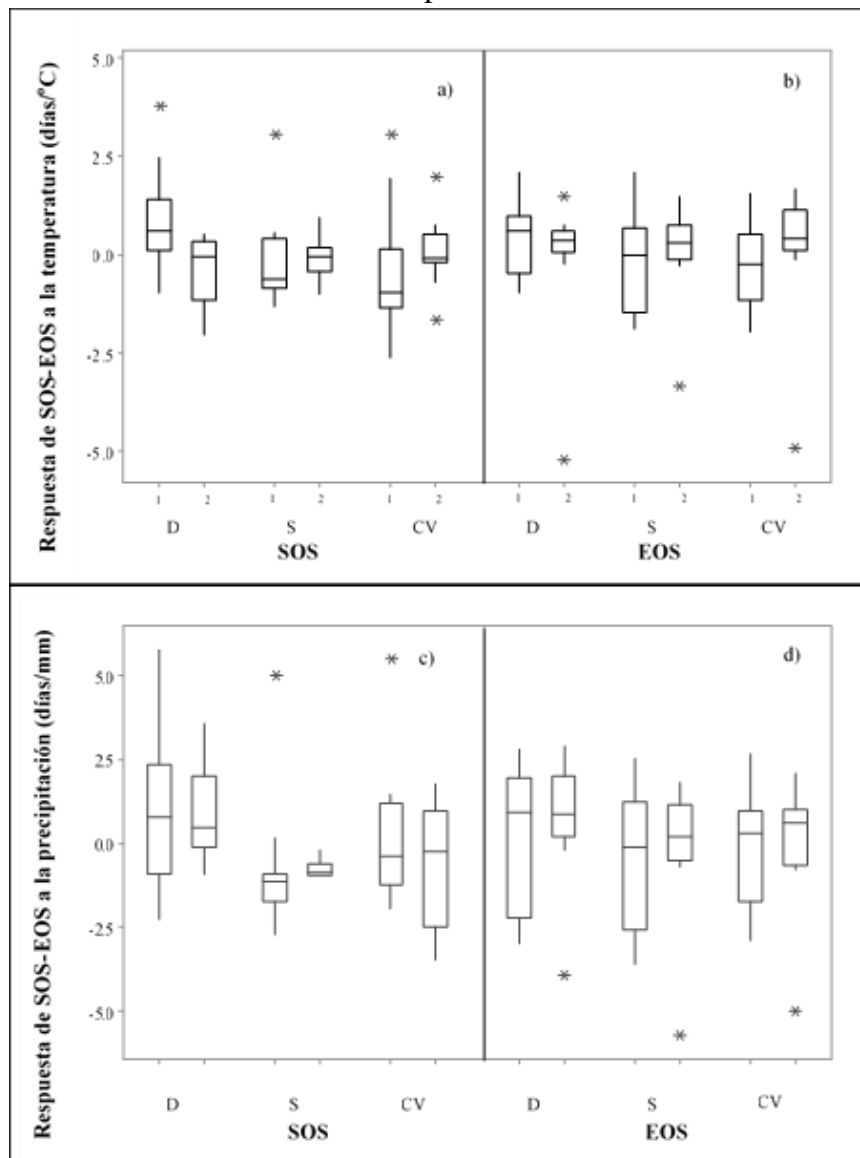
Algunos autores⁽³¹⁾ reportaron que durante 1959-1996, los eventos fenológicos de primavera de un gran número de especies se adelantaron en promedio 6.3 días, mientras que los de otoño han experimentado un retraso de 4.5 días en promedio; así, la estación de crecimiento se extendió en 10.8 días en promedio^(32,33). La reducción de las precipitaciones provocó un retraso en el EOS de 0.89, 0.02 y 0.45 días mm⁻¹ para las zonas D, CV y S, respectivamente (Figura 2d). Finalmente, la zona D mostró una sensibilidad significativamente menor a la temperatura antecedente, pero una sensibilidad significativamente mayor a la precipitación antecedente que las zonas CV y S. Los patrones fenológicos anticipados pueden alterar la distribución de los recursos vegetales del pasto banderita, tener implicaciones para los

sistemas de polinización y aumentar el tamaño, la riqueza de especies y la diversidad genética intraespecífica del banco de semillas del suelo⁽³⁴⁾.

Tendencias de cambio de SOS y EOS

Para informar de los cambios generales de SOS y EOS en las zonas ecológicas estudiadas, se comparó la media anual de SOS y EOS entre 2000-2010 y 2011-2019. Durante 2010-2019, el SOS y el EOS se retrasaron 16 ($P<0.05$) y 18 ($P<0.05$) días, respectivamente, en comparación con 2000-2019 (Figura 3).

Figura 3: Cambios generales en SOS y EOS en tres zonas ecológicas en afectación a la especie



1, periodo de 2000-2010; 2, periodo de 2011-2019. D= desierto; S= sierra; CV= valles centrales.

Los resultados del pasto banderita mostraron que la media del SOS de 2011-2019 fue 16 días más tardía ($P<0.05$) que la media del SOS de 2000-2010 para la zona D (Figura 3). Por el contrario, el SOS se adelantó 42 días para la zona CV ($P<0.05$) y 3 días para la zona S ($P<0.05$). Mientras tanto, el EOS no mostró cambios significativos ($P>0.05$) al comparar los dos períodos para las zonas CV y S. Sin embargo, se identificó un retraso significativo tanto para SOS como para EOS desde 2000-2010 hasta 2011-2019 ($P<0.05$) en la zona D. Durante 2011-2019, el SOS y el EOS se retrasaron 16 ($P<0.05$) y 18 ($P<0.05$) días respectivamente en comparación con 2000-2010.

Este estudio encontró correlaciones negativas significativas ($P<0.05$) entre el SOS y la precipitación y la temperatura precedente. Esto significa que temperaturas y precipitaciones más elevadas registradas antes del inicio de la estación pueden adelantar el inicio de la estación de crecimiento (SOS). Sin embargo, las zonas mostraron correlaciones significativas ($P<0.05$) entre el SOS y la precipitación antecedente que entre el EOS y la temperatura antecedente. Por lo tanto, la precipitación registrada en lugar de la temperatura puede controlar principalmente el inicio de la temporada de crecimiento en la mayor parte del área de estudio. Esto concuerda con los resultados de estudios anteriores basados en datos de fechas de verdeo, derivados de satélites y datos meteorológicos terrestres⁽³⁵⁾. Por otro lado, algunos estudios experimentales y de modelización de la fenología han destacado los efectos críticos de la disponibilidad de agua en la SOS en las praderas norteamericanas^(7,36) y mongolas^(2,11). Se ha informado que la temperatura es un factor clave para desencadenar los eventos fenológicos primaverales de las plantas en los ecosistemas templados⁽³⁷⁾ y de las especies herbáceas en los ecosistemas alpinos⁽³⁸⁾. El papel predominante de la temperatura en el SOS también se ha observado en los pastizales de Oriente Medio y en la meseta Tibetana⁽³⁹⁾.

Asimismo, las zonas ecológicas del área de estudio mostraron correlaciones positivas significativas ($P<0.05$) entre el EOS y la temperatura antecedente, lo que indica que la temperatura puede ser el factor más importante en la regulación de la dinámica estacional de la vegetación en los pastizales. Aunque la temperatura fue el factor dominante, la precipitación también se correlacionó positivamente con el EOS. Por tanto, unas condiciones otoñales más cálidas y húmedas podrían provocar un retraso en el proceso de senescencia de las hojas.

Comportamiento de SOS y EOS entre zonas ecológicas durante 2000-2010 y 2011-2019

El análisis factorial reveló que el día del año (doy) medio para el inicio de la temporada de crecimiento (SOS) de la especie fue de 160.55 ($P<0.05$). Los efectos significativos en el diseño factorial dependieron de la zona (D, CV, S) tanto para el SOS como para el final de

la temporada de crecimiento (EOS). El factor que causó el mayor cambio en SOS y EOS (es decir, la variabilidad en doy) fue la zona ecológica en la que crece la vegetación. La interacción entre las zonas ecológicas y los períodos de tiempo analizados influyó significativamente tanto en el SOS como en el EOS ($P < 0.005$).

Conclusiones e implicaciones

Esta investigación ha proporcionado una comprensión detallada sobre la dinámica estacional del pasto banderita [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.] en diferentes zonas ecológicas del estado de Chihuahua, México, utilizando un enfoque geoestadístico respaldado por datos satelitales y observaciones fenológicas *in situ*. Los resultados muestran que la variabilidad climática, particularmente en temperatura y precipitación, afecta el inicio (SOS) y final (EOS) de su temporada de crecimiento. Se observó que en la zona desértica (D), el SOS ocurre antes debido a temperaturas más altas. Además, la disminución de precipitación retrasó el SOS en todas las zonas, mientras que, en otoño, las temperaturas más cálidas extendieron el EOS en la zona D. La comprensión de la dinámica estacional de esta especie es esencial para desarrollar prácticas de manejo sostenible que aseguren la resiliencia de estos ecosistemas frente al cambio climático. Los resultados obtenidos proporcionan una base científica robusta para la toma de decisiones informadas en la gestión de los recursos naturales en la región, promoviendo la sustentabilidad y la adaptación a las nuevas condiciones ambientales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Literatura citada:

1. IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ Press; 2014.
2. Smith J, Doe J, Clark H. Temporal and spatial variability in phenological responses of grass species. *J Ecol* 2020;108(5):1234-1245.
3. Liu Q, Fu YH, Zeng Z, Huang M, Li X, Piao S. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Glob Change Biol* 2019;25(3):644-655.

4. Sánchez, DH, Navarro-Gómez CJ, Rentería M, Rose JF, Sánchez-Navarro JR. Evolution of the groundwater system in the Chihuahua-Sacramento aquifer due to climatic and anthropogenic factors. *J Water Clim Change* 2022;13(2):645-663.
5. Jones MB, Donnelly A. Responses of Irish vegetation to future climate change. *Biol Environ Proc R Ir Acad* 2018;118(2):157-168.
6. Williams K, Clark, J. Global warming extends the growing season across ecosystems. *Environ Res Lett* 2021;16(1):14-23.
7. Schwartz MD. *Phenology: An integrative environmental science*. Berlin, Germany Springer; 2013:170-171.
8. Badeck FW, Bondeau AK, Böttcher D, Doktor W, Lucht J, Schaber S. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol* 2004;162:295-309.
9. Richardson AD, Keenan TF, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agric For Meteorol* 2017;169:156-173.
10. Crimmins TM, Crimmins MA, Bertelsen C. Complex responses to climate drivers in onset of spring flowering across a semi-arid elevation gradient. *J Ecol* 2010;98:042-1051.
11. Lesica P, Kittelson P. Precipitation and temperature are associated with advanced flowering phenology in a semi-arid grassland. *J Arid Environ* 2010;74:1013-1017.
12. Zhang X, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Hodges JCF, Gao F, Reed BC, Huete A. Monitoring vegetation phenology using modis. *Remote Sens Environ* 2003;84:471-475.
13. Delbart N, Picard G, Le Toan T, Kergoat K, Quegan S, Woodward I, Dye D, Fedotova V. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Glob Change Biol* 2008;14:603-614.
14. Stumpf F, Schneider MK, Keller A, Rentschler T, Meuli RG, Liebisch, F. Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecol Indic* 2020;113:106-121.
15. Schwartz MD. *Phenology: An integrative environmental science*. Springer 2013;1:20.

16. Piao S, Tan J, Chen A, Fu YH, Ciais P, Liu Q, Janssens IA, Vicca S, Zeng Z, Jeong SJ. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature. *Nat Commun* 2015;6:69-81.
17. Bloor JM, Pichon P, Falcimagne R, Leadley P, Soussana JF. Effects of warming, summer drought, and CO₂ enrichment on aboveground biomass production, flowering phenology, and community structure in an upland grassland ecosystem. *Ecosystems* 2010;13:888-900.
18. Hovenden MJ, Wills KE, Vander-Schoor JK, Williams AL, Newton PC. Flowering phenology in a species-rich temperate grassland is sensitive to warming but not elevated CO₂. *New Phytol* 2008;178:815-822.
19. Zelikova TJ, Williams DG, Hoenigman R, Blumenthal DM, Morgan JA, Pendall E. Seasonality of soil moisture mediates responses of ecosystem phenology to elevated CO₂ and warming in a semi-arid grassland. *J Ecol* 2015;103:1119-1130.
20. Piazza V. Estimación satelital de la productividad primaria neta aérea de la vegetación herbácea del Caldenal [disertación doctoral]. Buenos Aires, Argentina; 2006.
21. Morales-Nieto CR, Quero-Carrillo A, Pérez-Pérez J, Hernández-Garay A, Le-Blan O. Caracterización morfológica de poblaciones nativas de pasto banderita [(Michx.) Torr.] en México. *Agrociencia* 2008;42(7):767-775.
22. Breman H, De Wit C. Rangeland productivity and exploitation in the Sahel. *Science* 1983;221:1341-1347.
23. Butt B, Turner MD, Singh A, Brottem L. Use of modis NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in sudano-sahelian West Africa. *Remote Sens Environ* 2011;115:3367-3376.
24. Arzani H, Zohdi M, Fish E, Zahedi-Amiri G, Nikkhah A, Wester D. Phenological effects on forage quality of five grass species. *J Range Management* 2004;57:624-629.
25. Gorlier A, Lonati M, Renna M, Lussiana C, Lombardi G, Battaglini L. Changes in pasture and cow milk compositions during a summer transhumance in the Western Italian Alps. *J Appl Bot Food Qual* 2013;(85):216-231.

26. Ortega-Gaucin D, Velasco I. Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC* 2013;5(2):78-90.
27. Gonsamo A, Chen JM. Continuous observation of leaf area index at fluxnet-Canada sites. *Agric For Meteorol* 2014;189:168-174.
28. INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 2003. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Chihuahua, 1a.ed. Editorial INEGI. México. 2013.
29. CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Capacidad de Almacenamiento y Uso de las Principales Presas de México. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/atlas.html?seccion=2mapa=5>. Consultado 4 Abr, 2021.
30. Chen X, Li J, Xu L, Liu L, Ding D. Modeling green up date of dominant grass species in the inner Mongolian grassland using air temperature and precipitation data. *Int J Biometeorol* 2014;58:463-471.
31. Vermote E, Vermeulen. Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectances (MOD09), ATBD version 4; Department of Geography, University of Maryland: College Park, MD, USA. 1999.
32. Busetto L, Colombo R, Migliavacca M, Cremonese E, Meroni M, Galvagno M, *et al.* Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Glob Change Biol* 2010;16:2504-2517.
33. Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int J Biometeorol* 2000;44:76-81.
34. Peñuelas J, Filella I. Responses to a warming world. *Science* 2001;294:793-795.
35. Chen X, Xu L. Phenological responses of *Ulmus pumila* (Siberian Elm) to climate change in the temperate zone of China. *Int J Biometeorol* 2012;56:695-706.
36. Chen X, An S, Inouye MD. Temperature and snowfall trigger alpine vegetation green-up on the world's roof. *Glob Change Biol* 2015;21:3635-3646.
37. Peñuelas J, Filella I. Responses to a warming world. *Science* 2001;294(3):793-795.

38. Roetzer T, Wittenzeller M, Haeckel H, Nekovar J. Phenology in central Europe—differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *Int J Biometeorol* 2000;44:60–66.
39. Walkovszky A. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia L.*) in Hungary. *Int J Biometeorol* 1998;41:155–160.