

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

MONITOREO TRANSESCALAR DE LA FENOLOGÍA DE BOSQUES TEMPLADOS EN ÁREAS NATURALES
PROTEGIDAS DEL CINTURÓN VOLCÁNICO TRANSMEXICANO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

ERIKA ROCÍO REYES GONZÁLEZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. LETICIA GÓMEZ MENDOZA

(FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS, UNAM)

CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO DE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado principalmente a mi familia. A mi mamá, **Antonia González**, mi papá **Jorge Reyes**, a mis hermanas **Carla y Cecilia** y a mi hermano **Martín**. No tengo palabras para agradecer todo su apoyo y cariño.

A los seres más fieles y amorosos, **Luna y Capi**, por no dejarme sola durante las largas noches de trabajo. Fueron mi mejor compañía para aminorar el cansancio. Desearía que fueran eternos.

A mis abuelos **Ignacio González†**, **Felipe Reyes†** y **Asunción González†**. Por más que pasen los años, cada logro estará dedicado a ustedes. Nos volveremos a encontrar pronto.

A **Gustavo Hernández**, por todo su apoyo, por los ánimos cuando estaba a punto de darme por vencida, por ayudarme siempre que lo necesité. Las palabras no me alcanzan para agradecerte todo lo que has hecho por mí.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, ese ser de luz que siempre que acompaña y guía y que hoy me ha permitido llegar hasta aquí para culminar esta etapa de mi vida.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado en Geografía**, por todas las oportunidades que me ha brindado para mi desarrollo profesional. Por ser ahora el lugar en el que puedo transmitir mis conocimientos a las nuevas generaciones de geógrafos. Estoy más que orgullosa de pertenecer a esta gran institución educativa. “Por mi raza hablará el espíritu”.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca otorgada para llevar a cabo mis estudios de doctorado

Al **Proyecto PAPIIT IN-308220** “Vulnerabilidad agrícola y forestal ante el clima en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca” a cargo de la Dra. Leticia Gómez Mendoza, por la beca de titulación otorgada para finalizar esta tesis de doctorado.

A cada uno de los miembros de mi sínodo. A la **Dra. Isabel Ramírez, al Dr. Jean Francois Mas, al Dr. Mauricio Galeana y al Dr. José Villanueva** por sus observaciones a mi trabajo, las cuales me ayudaron de sobremanera para mejorarlo.

A mi comité tutor. A la **Dra. Leticia Gómez**, con quien estoy profundamente agradecida por todo su apoyo, su amistad, por confiar en mi siempre, por darme ánimos y por ayudarme para continuar en este mundo tan maravilloso de la investigación. No tengo palabras para expresarle todo mi agradecimiento por ser una excelente tutora, académica y persona. La admiro mucho y se ha convertido en mi ejemplo a seguir. Este logro es de ambas. Con mucho cariño le dedico estas líneas.

Al **Dr. Víctor Barradas**, por tener las palabras correctas para guiarme en el camino de la investigación, por todos los conocimientos compartidos y por todo el interés que puso en ayudarme para concretar esta tesis. Siempre me motivo para arriesgarme, para mejorar personal y académicamente y para siempre ir un paso más allá de mi zona de confort. Le agradezco por haber aceptado ser parte de mi investigación, y apoyarme este proyecto.

Al **Dr. Ángel Terán**, por su apoyo, por las amenas pláticas, por abrirme siempre las puertas de su casa. Por todas las oportunidades brindadas que me ayudaron para mi desarrollo profesional. Por tenerme siempre presente cuando de proyectos y otras actividades se trataba. Muchas gracias, Dr. por todo lo que hizo por mi durante mi estancia en el CIEMAD.

A mis amigos de la carrera y posgrado. A **Bel, Lau, Diana, Arturo, Diana Zarco y Ricardo**. Por su amistad sincera, apoyo y compañía durante esta etapa de mi vida.

A mis compañeras maestras y amigas del IIC **Ángeles, Lety Jerónimo, Lety Cortés, Martha, Sofi y Elo**, quienes me recibieron con los brazos abiertos y siempre obtuve de ellas apoyo y amistad. Espero que nuestras reuniones se sigan repitiendo por muchos años más. Las aprecio mucho.

Al **Instituto de Integración Cultural A.C.**, al **profesor Enrique, a Anita** y especialmente a la **maestra Esperanza** por darme la oportunidad de comenzar mi carrera docente, por otorgarme las facilidades necesarias para realizar mis actividades académicas y llevar a cabo mis salidas a campo, agradezco infinitamente todas las consideraciones que siempre tuvo conmigo.

A **Alternare, A.C., a Lupita, Anita, Guille y al Sr. Gabriel**, por siempre recibirme con una sonrisa, por apoyarme para llevar a cabo mi trabajo de campo y con las comunidades.

Un agradecimiento muy especial a **Tacho, Gera y Jaime**. Gracias por hacer más ameno mi trabajo de campo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, por cuidar de mi, por las pláticas durante las jornadas de monitoreo. Con ustedes aprendí infinidad de cosas acerca de los bosques y de la vida misma. Gracias por brindarme un poco de su tiempo cada mes para poder lograr este objetivo. Agradezco con el corazón toda su ayuda.

Al **Sr. Domingo Morales** por su apoyo durante mi trabajo de campo en el Santuario de las Luciérnagas, por su disposición siempre para emprender nuevos proyectos. Admiro su dedicación y compromiso por el cuidado del medio ambiente, nos esperan aún muchos proyectos por realizar.

A mi **familia, a mis tías, tíos y abuelita** por todo su cariño.

A **Gustavo Hernández** por todo su apoyo para llevar a cabo mi trabajo de campo para la obtención de los datos fenológicos. Por nunca dejarme sola, por cuidar de mi y ver por mi seguridad durante mis visitas al Nevado de Toluca. Agradezco enormemente tu ayuda desinteresada por estar conmigo mes a mes para recabar mis datos. Por las noches que pasaste de desvelo conmigo esperando a que terminara mi trabajo. Por seguir juntos a pesar de las adversidades. Te amo, mucho es poco...

Agradezco a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa de mi vida y que debido a lo extenso de los agradecimientos haya podido olvidar mencionar.

Gracias a la vida que me ha llevado por el maravilloso camino de la investigación, por el cual espero seguir hasta el fin de mis días.

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
INTRODUCCIÓN	V
Marco teórico	VI
Planteamiento del problema.....	XIV
Justificación.....	XVI
Sitios de estudio	XVII
Objetivos	XIX
Hipótesis.....	XX
Referencias.....	XX

CAPÍTULO I. MÉTODOS

I.1 Revisión del estado del arte	3
I.2 Análisis de datos climatológicos.....	3
I.3 Monitoreo fenológico por medio de observaciones en superficie	3
I.3.1 Selección y ubicación de los sitios de monitoreo.....	4
I.3.2 Selección de las especies	5
I.3.3 Fases fenológicas monitoreadas.....	8
I.3.4 Frecuencia de monitoreo.....	9
I.4 Monitoreo fenológico por medio de percepción remota.....	9
I.4.1 Selección del sensor remoto.....	9
I.4.2 Cálculo de índices de vegetación.....	10
I.4.3 Generación del Índice de Vegetación Normalizado de Bosques Perenes.....	10
I.5 De la fenología de individuos a la de poblaciones.....	11
I.6 Comparación en ambas escalas de monitoreo.....	11
Referencias.....	12

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING IN FOREST ECOSYSTEMS. A CONTENT-ANALYSIS-BASED REVIEW

Abstract	14
II.1 Introduction	15
II.2 Materials and methods.....	19
II.3 Results and discussion.....	21
II.3.1 Review of cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems.....	21

II.3.2 Problems and research objectives in cross-scale phenological monitoring	23
II.3.3 Getting phenological data for cross-scale comparison	26
II.3.4 Land surface phenological monitoring: sensors and vegetation indices.....	26
II.3.5 Ground-based phenology: from citizen science to phenocams.....	31
II.3.6 Challenges in cross-scale phenological comparison.....	35
Conclusions	37
References	39

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA: EL CASO DE *ALNUS ACUMINATA* EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA

III.1 Introducción	49
III.2 Método	54
III.2.1 Selección del sitio de monitoreo	54
III.2.2 Análisis de información climática.....	55
III.2.3 Monitoreo fenológico en superficie	56
III.2.4 Relaciones fenología-clima	58
III.3 Resultados	58
III.3.1 Climatología anual y anomalías de temperatura y precipitación (1980-2020).....	58
III.3.2 Climatología anual y anomalías de temperatura y precipitación de los años de monitoreo (mayo 2018 -abril 2019).....	61
III.3.3 Ciclo fenológico anual. Observaciones <i>in situ</i>	63
III.3.4 Relaciones fenología-clima	66
Discusión.....	68
Conclusiones	71
Referencias	72

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR PARA *PINUS HARTWEGII* LINDL EN EL CENTRO DE MÉXICO UTILIZANDO ÍNDICES DE VEGETACIÓN TRADICIONALES Y UN ÍNDICE DE VEGETACIÓN *AD HOC*

Resumen.....	75
IV.1 Introducción	76
IV.2 Materiales.....	79
IV.2.1 Sentinel-2	79
IV.2.2 Satellite pour l'Observation de la Terre (SPOT-7).....	81
IV.3 Métodos y área de estudio.....	82
IV.3.1 Fases fenológicas monitoreadas.....	83

VI.3.2 Monitoreo fenológico por medio de percepción remota	84
IV.3.3 Procesamiento de las imágenes.....	85
VI.3.4 Cálculo de NDVI	85
VI.3.5 Generación de índice de vegetación <i>ad hoc</i> (Normalized Evergreen Forest Vegetation Index)	87
IV.3.6 Monitoreo fenológico transescalar	89
IV.3.7 De la fenología de individuos a la de poblaciones	90
IV.3.8 Comparación en ambas escalas de monitoreo.....	94
IV.4 Resultados	94
IV.4.1 Fenología de <i>Pinus hartwegii</i> observada <i>in situ</i>	94
IV.4.2 Land surface phenology	95
IV.4.3 Comparación de observaciones en superficie y percepción remota.....	96
Discusión.....	103
Conclusiones	106
Referencias.....	107
DISCUSIÓN GENERAL.....	112
Referencias.....	126
CONCLUSIONES.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I. Valores intrínsecos de los bosques templados.....	VIII
Figura II. Ubicación de los sitios de monitoreo fenológico.....	XVIII
Figura I.1 Diagrama metodológico	2
Figura I.2 Ejemplo de a) señalización de <i>Alnus jorullensis</i> y; b) geoposicionamiento de <i>Cupressus lusitanica</i>	6
Figura I.3 Ejemplo de la fenofase “Desarrollo de hojas” en <i>Pinus hartwegii</i> y <i>Alnus acuminata</i>	8
Figure II.1 Flow chart of information filters for different phases of a cross-scale phenological monitoring systematic review	20

Figure II.2 Data analyzed and used to build the analysis matrix for scientific articles. Based on the SALSA framework	21
Figure II.3 Number of articles published by region and country.....	22
Figure II.4 Number of articles published per year	23
Figure II.5 Number of articles based on the device used to characterize the phenology of vegetation through observations in situ	32
Figure II.6 Most common phenological phase monitoring in forest ecosystems and comparisons between remote sensing and ground-based monitoring	33
Figure II.7 Flowchart for cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems	36

Figura III.1 Ubicación del sitio de monitoreo en el paraje “La Entrada” en la RBMM	55
Figura III.2 a) precipitación media anual y b) anomalías de precipitación en el sitio “La Entrada”	59
Figura III.3 a) temperaturas máximas, mínimas y promedio anuales y b) anomalías de temperatura en el sitio “La Entrada”	61
Figura III.4 Climatología mensual registrada durante los meses de monitoreo fenológico de la especie <i>Alnus acuminata</i> en el paraje “La Entrada”	62
Figura III.5 a) anomalías de temperatura y b) anomalías de precipitación durante los meses de monitoreo fenológico de la especie <i>Alnus acuminata</i> en el sitio “La Entrada”	63
Figura III. 6 Fases fenológicas de <i>Alnus acuminata</i> observadas en in situ durante el trabajo de campo.....	65
Figura III.7 Fases fenológicas de la especie <i>Alnus acuminata</i> y su intensidad en el sitio “La Entrada” en la RBMM.....	66
Figura III.8 Ciclo fenológico anual de <i>Alnus acuminata</i> en el sitio “La Entrada” de la RBMM.....	66

Figura IV.1 Ubicación de los sitios de monitoreo en superficie en el APFFNT.	83
Figura IV.2 Análisis espectral de la vegetación de interés	87
Figura IV.3 a) Imagen satelital SPOT-7 del del sitio de estudio y su comparación con los resultados de la clasificación supervisada	93
Figura IV.4 Fases fenológicas e intensidades de la población de <i>Pinus hartwegii</i> observadas durante un año de monitoreo en el APFFNT.....	95
Figura IV.5 Meses en los que se presentaron los valores máximos y mínimos para: a)NDVI y; b)NEFVI.....	96
Figura IV.6 Fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de <i>Pinus hartwegii</i> en el APFFNT.....	98
Figura IV.7 Fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de <i>Pinus hartwegii</i> en el APFFNT.....	99

Figura IV.8 Comparación de la fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de <i>Pinus hartwegii</i> en el APFFNT.....	101
Figura IV.9 comparación de la fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de <i>Pinus hartwegii</i> en el APFFNT	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1 Sitios de monitoreo, especies e individuos monitoreados en cada área natural protegida.....	7
Tabla I.2 Ejemplo de medida de la intensidad de las fenofases en un individuo de <i>Pinus hartwegii</i> en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca	9
Table II.1 Vegetation indices used to measure the phenology of vegetation in forest ecosystems.....	30
Tabla III.1 Usos y aplicaciones de la especie <i>Alnus acuminata</i> en diferentes países	52
Tabla III.2 Coeficientes de determinación y RMSE entre la respuesta fenológica de <i>Alnus acuminata</i> y las variables climáticas del área de estudio	67
Tabla IV.1 Características de las bandas de Sentinel-2.....	80
Tabla IV.2 Características de las imágenes SPOT-7.....	82
Tabla IV.3 Fechas de monitoreo en campo y fecha de la imagen.....	86

RESUMEN

En el campo de estudio de la geografía, el medio natural tiene gran relevancia. Sus indicios se remontan al positivismo geográfico el cual adjudicaba a la naturaleza la causa de los hechos espaciales. Sin embargo, esta corriente de pensamiento no se encuentra vigente en la actualidad. No obstante, las actividades del ser humano continúan transformando el medio natural y con ello consecuencias como los cambios en el clima se han visto reflejadas en los espacios naturales. Desde esta perspectiva, se aborda en este trabajo el análisis de la fenología de la vegetación. La fenología se encarga del estudio de los eventos recurrentes del ciclo de vida de plantas y animales y su relación con el clima. El estudio de la fenología ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a su sensibilidad ante los cambios en el clima; esta característica, ha permitido utilizar los datos fenológicos para crear indicadores de cambio climático. Los datos fenológicos *in situ* son escasos, por este motivo se ha recurrido al uso de imágenes satelitales para generar información sobre la respuesta de las plantas a variables como la temperatura y la precipitación.

La combinación de dos o más técnicas de monitoreo (ciencia ciudadana, cámaras fenológicas o percepción remota) se conoce como monitoreo fenológico transescalar o cross-scale phenological monitoring en inglés. El presente trabajo mostró que este tipo de estudios transescalares se han llevado a cabo principalmente en países como Estados Unidos, Canadá y China. Entre las principales formas que se ha generado información fenológica *in situ* se encuentran, la ciencia ciudadana, las cámaras digitales de repetición o “Phenocams” y las torres de flujo.

Por otro lado, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), destacó como uno de los principales índices utilizados alrededor del mundo. A pesar de las deficiencias del NDVI para caracterizar la fenología principalmente de especies perenes, de las fases fenológicas de otoño y en condiciones de nieve, este índice fue utilizado en el 65% de los trabajos revisados en el capítulo II de esta tesis. Lo anterior denota que el NDVI, continúa vigente y siendo de utilidad para caracterizar la fenología de las especies. Sin embargo, otros índices de vegetación que demostraron caracterizar con mayor precisión la fenología de la vegetación, como el EVI (Enhanced Vegetation Index) comienzan a cobrar relevancia al utilizarse en el 28% de los trabajos analizados.

Se exponen los resultados de un año de monitoreo de especies representativas de los bosques templados del centro de México. Se muestra el ciclo fenológico completo de las especies *Alnus*

acuminata y *Pinus hartwegii* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca respectivamente. En el caso particular de la Reserva de la Mariposa Monarca, se identificaron las condiciones climáticas del sitio de estudio. Se detectaron tendencias positivas en la temperatura y negativas para la precipitación. Se realizaron modelos de regresión entre las variables climáticas y la fenología, identificando una relación estrecha entre las temperaturas y el desarrollo fenológico de la especie *Alnus acuminata*; principalmente la influencia de la temperatura mínima en la floración ($R^2= 0.8285$). Estas relaciones estrechas entre la temperatura y la fenología de *Alnus acuminata* ponen en la mira a esta especie para identificar como responderá a futuro a las alteraciones del sistema climático y sus repercusiones indirectas en las comunidades humanas.

Los datos recabados *in situ* en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca permitieron validar la información generada por medio imágenes de satélite Sentinel-2 para el periodo de junio de 2018 y hasta mayo de 2019. Ante las deficiencias que se identificaron en el uso del NDVI, este estudio propone la generación de un nuevo índice de vegetación (NEFVI) para caracterizar los cambios en el verdor de las especies perenes de bosques templados. Este índice mostró resultados satisfactorios ($R^2=0.7098$) para representar la fenología del desarrollo de nuevas hojas de *Pinus hartwegii*, en comparación con el NDVI ($R^2=0.2627$). La información derivada de imágenes de satélite y su validación con información en campo gracias a las observaciones realizadas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca evidenciaron una alta confiabilidad del NEFVI para caracterizar el ciclo fenológico de las especies perennifolias de bosque templado similar a lo observado en campo. Lo anterior permitirá generar información fenológica por medio de percepción remota con una alta confiabilidad, ante la falta de observaciones en campo.

ABSTRACT

In the field of study of geography, the environment has great relevance. Its traces go back to geographic positivism, which attributed the cause of spatial facts to nature. However, this current of thought is no longer valid today. Nevertheless, human activities continue to transform the environment and with it, consequences such as changes in climate have been reflected in natural spaces. From this perspective, the analysis of the phenology of vegetation is approached in this work. Phenology deals with the study of recurrent events in the life cycle of plants and animals and their relationship with climate. The study of phenology has

gained great relevance in recent years due to its sensitivity to changes in climate; this characteristic has made it possible to use phenological data to create indicators of climate change. Phenological data *in situ* are scarce; for this reason, satellite imagery have been used to generate information on plant response to variables such as temperature and precipitation.

The combination of two or more monitoring techniques (citizen science, phenological cameras or remote sensing) is known as cross-scale phenological monitoring. The present work showed that this type of trans-scalar studies has been carried out mainly in countries such as the United States, Canada and China. Among the main ways in which phenological information has been generated *in situ* are citizen science, digital repeating cameras or "Phenocams" and flux towers.

On the other hand, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) stood out as one of the main indices used around the world. Despite the deficiencies of NDVI to characterize the phenology mainly of perennial species, autumn phenological phases and snow conditions, this index was used in 65% of the works reviewed in Chapter II of this thesis. This shows that the NDVI continues to be useful to characterize the phenology of species. However, other vegetation indices that have shown to characterize more accurately the phenology of vegetation, such as the EVI (Enhanced Vegetation Index), are beginning to gain relevance as they are used in 28% of the works analyzed.

The results of one year of monitoring of representative species of the temperate forests of central Mexico are presented. The complete phenological cycle of the species *Alnus acuminata* and *Pinus hartwegii* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve and the Flora and Fauna Protected Area Nevado de Toluca, respectively, is shown. In the particular case of the Monarch Butterfly Reserve, the climatic conditions of the study site were identified. Positive trends in temperature and negative trends in precipitation were detected. Regression models were performed between climatic variables and phenology, identifying a close relationship between temperatures and phenological development of the species *Alnus acuminata*; mainly the influence of minimum temperature on flowering ($R^2= 0.8285$). These close relationships between temperature and phenology of *Alnus acuminata* put this species in the spotlight to identify how it will respond in the future to alterations in the climate system and their indirect repercussions on human communities.

Data collected in situ in the Flora and Fauna Protected Area Nevado de Toluca, allowed validation of the information generated through Sentinel-2 satellite imagery for the period from June 2018 to May 2019. Given the deficiencies identified in the use of NDVI, this study proposes the generation of a new vegetation index (NEFVI) to characterize changes in the greenness of temperate forest perennial species. This index showed satisfactory results ($R^2=0.7098$) to represent the phenology of the development of new leaves of *Pinus hartwegii*, in comparison with NDVI ($R^2=0.2627$). The information derived from satellite images and its validation with field information thanks to observations made in the Flora and Fauna Protected Area Nevado de Toluca, showed a high reliability of the NEFVI to characterize the phenological cycle of temperate forest evergreen species similar to what was observed in the field. This will allow generating phenological information through remote sensing with high reliability, in the absence of field observations.

INTRODUCCIÓN

El espacio geográfico se encuentra en constante cambio. Dejando de lado el enfoque del determinismo geográfico que adjudicaba a la naturaleza la causa de los hechos espaciales, el medio natural aún tiene gran relevancia en el estudio de los fenómenos geográficos. Dentro del campo de estudio de la geografía, es necesario identificar las consecuencias de las acciones del hombre sobre el medio (Dollfus, 1976). De acuerdo con García (2006) el estudio de un ecosistema natural debe involucrar el conjunto de elementos que han intervenido en su modificación por parte del hombre; es decir, supone concebirlo como un sistema complejo.

Las actividades del ser humano se han encargado de transformar el medio natural y con ello consecuencias como los cambios en el clima se han visto reflejadas en los espacios naturales (Dollfus, 1976). El efecto del clima sobre los seres humanos se puede observar de manera indirecta a través de los suelos, la agricultura o la vegetación (Mendoza, 2011), esta última, objeto de estudio de este trabajo. En análisis de la fenología, dentro del campo de estudio de la ciencia geográfica permite identificar las consecuencias del clima de manera directa sobre la flora e indirecta sobre los seres humanos. Esta forma indirecta puede verse reflejada por ejemplo en la provisión de servicios ecosistémicos.

Por otro lado, la Geografía se ha visto influenciada por el avance en las tecnologías de la información y sus líneas de investigación se han adaptado a problemáticas dominantes en cada momento (Santarelli y Campos, 2002). El monitoreo de la fenología utilizando técnicas de percepción remota y datos *in situ*, es una de las temáticas relevantes en el mundo actual. Esta información ha permitido analizar los ciclos de crecimiento de las especies presentes en los ecosistemas y los efectos de los cambios en el clima sobre la vegetación. Dichos cambios afectan también de manera indirecta a las comunidades humanas, ámbito en el cual la

geografía, por su carácter de ciencia social juega un papel importante para evaluar y comprender la respuesta de los sistemas naturales y sociales a las variaciones en el sistema climático. A pesar de que la evaluación de las repercusiones sociales producto de los cambios fenológicos no son objeto de estudio en este trabajo; se espera que, los datos e información generada puedan apoyar trabajos futuros para lograr este fin.

Marco teórico

Los bosques templados y su importancia

Los bosques templados se localizan alrededor del mundo entre los 20° y 60° de latitud norte y sur. Su distribución es distinta en ambos hemisferios debido a factores climáticos, oceanográficos y orográficos; además de que los bosques templados del hemisferio sur carecen de la extensión que presentan estos ecosistemas en el hemisferio norte (Gilliam, 2016). En Norte América, estos ecosistemas se distribuyen en el este y la costa del Pacífico en Estados Unidos, hasta Canadá. Dominan en todo el territorio de Inglaterra, el norte de Europa, hasta Rusia, este de China y Japón. En el hemisferio sur, su distribución es más restringida y se les puede encontrar en el sur de Chile, sureste de Australia, Tasmania y Nueva Zelanda (Gilliam, 2016; McGlone *et al.* 2016). El clima de esta región presenta cambios cíclicos y estacionales con periodos de crecimiento y letargo; sin embargo, muestran una gran variabilidad en función de la latitud, la topografía y la continentalidad (Alaback, 1991). Respecto a la vegetación se pueden encontrar numerosos géneros de gimnospermas como *Cedrus*, *Picea*, *Pinus* y *Tsuga* y angiospermas como *Acer*, *Betula*, *Carya*, *Corylus*, *Castanea*, *Fagus*, *Magnolia*, *Quercus*, *Tilia*, *Ulmus* y *Liquidambar* (Xiang *et al.* 2000; Graham, 2011). Los bosques templados de México son comunidades dominadas por árboles de gran altura, en su mayoría coníferas y encinos pertenecientes a las familias *Pinaceae* y *Fagaceae*

INTRODUCCIÓN

respectivamente (Alfaro *et al.* 2020). La vegetación arbórea es acompañada por otras especies arbustivas y herbáceas (CONABIO, 2012b). La composición florística de estos ecosistemas es determinada por el clima. En estos tipos de ecosistemas generalmente dominan una o dos especies principalmente de coníferas (66.4% de las especies), las cuáles en algunos casos coexisten con especies latifoliadas (33.6% de las especies; Granados *et al.* 2007).

De acuerdo con la FAO (2021) los bosques templados abarcan el 16% de la superficie del planeta. En el caso de México, la mayoría de los bosques templados se distribuyen en las zonas montañosas entre altitudes de 2000 a 3400 m y cubren aproximadamente el 16% del territorio Nacional (Challenger y Soberón 2008; CONABIO, 2012b; Galicia *et al.* 2018). El Cinturón Volcánico Transmexicano es una de las sierras donde se han desarrollado este tipo de ecosistemas (Challenger y Soberón 2008). Entre los principales tipos de bosques templados presentes en nuestro país se encuentran los bosques de pino, bosques de oyamel, bosques de encino y bosques mesófilos de montaña (Granados *et al.* 2007).

Los bosques templados poseen un valor ecológico importante debido a la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que pueden utilizar para producir carbohidratos durante la fotosíntesis (Granados *et al.* 2007). Como se muestra en la figura I, los bosques templados poseen valores intrínsecos que contribuyen al equilibrio dentro del ecosistema; además, proporcionan bienes y servicios a las comunidades humanas.



Figura I. Valores intrínsecos de los bosques templados. Fuente: elaboración propia con base en Granados *et al.* 2007

A pesar de su relevancia, los bosques templados enfrentan graves problemáticas relacionadas con la erosión y la disminución de la infiltración del agua en los suelos y la pérdida de la diversidad biológica, la deforestación y la mortalidad de los árboles de coníferas debido a la presencia de insectos descortezadores (del Val y Sáenz, 2017). A pesar de que la eliminación de la cobertura vegetal continúa en los ecosistemas forestales, la tasa de pérdida es menor en comparación con años anteriores. La Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021) estimó que en el periodo de 2015-2020 la tasa anual de deforestación fue de 10 millones de ha. Lo anterior supone una disminución en este proceso en comparación con los 12 millones de ha registradas durante el periodo 2010-2015 (FAO, 2021).

¿Qué es fenología?

La floración, la formación de brotes o el desarrollo de hojas forman parte del estudio de la fenología (Hannah, 2022). La palabra “Fenología” se deriva de la palabra griega “Phaino” la cual significa mostrar o aparecer. La Fenología se refiere al estudio de los eventos biológicos periódicos de las plantas y animales los cuales están influenciados por el tiempo y el clima (Schwartz, 2003). En el sentido estricto fenología significa el estudio del momento en que ocurren los eventos del ciclo de vida de los seres vivos. Sin embargo, a menudo es utilizada como sinónimo de los procesos biológicos por sí mismos. El desarrollo de brotes en un árbol forma parte del estudio de la fenología de las especies pues se presenta de forma regular en el tiempo.

El cambio climático ha propiciado que la floración de algunas plantas ocurra año con año cada vez más temprano (Prevéy *et al.* 2019) o que se modifique la fecha de aparición de ciertos eventos del ciclo de vida de algunos animales (Rosemartin *et al.* 2013). De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) se han presentado avances de 2.8 ± 0.35 días por década en la fenología de primavera de plantas y animales (Hoegh *et al.* 2018). Un ejemplo de ello es la floración anticipada de los árboles de cerezo en Japón (Primack *et al.* 2009). Estos cambios en los ciclos biológicos de los cerezos responden principalmente a condiciones climáticas más cálidas y a inviernos más cortos (Hannah, 2022). El monitoreo de la fenología vegetal ha facilitado el entendimiento de los cambios pasados en la vegetación, ayudando así a predecir modificaciones futuras basadas en el conocimiento previo (Kuenzer *et al.* 2015; Hannah, 2022).

Fenología forestal

INTRODUCCIÓN

Al igual que otros aspectos del funcionamiento de los ecosistemas la fenología se ha visto afectada por el fenómeno del cambio climático (Hoegh *et al.* 2018). Los cambios en el clima han alterado la fecha de aparición y frecuencia de los eventos fenológicos, dando como resultado variaciones en el comportamiento de muchos organismos (Gray y Ewers, 2021). Ejemplo de lo anterior se ve reflejado en desajustes entre la floración de algunas especies de plantas y polinizadores, presas y depredadores y plagas con su huésped (Donnelly *et al.* 2011). Ante estas modificaciones en la fenología de las especies, en los últimos años se ha puesto especial énfasis en el monitoreo de los cambios en los ecosistemas derivados del cambio ambiental global.

Los ecosistemas forestales no se encuentran exentos de las implicaciones que ejercen los cambios en el clima en su fenología. Lo anterior debido a que los bosques tropicales modulan su respuesta fenológica por las variaciones en la precipitación; mientras que, los ecosistemas de bosque templado lo hacen con base en las variaciones anuales de la temperatura. Por otro lado, la respuesta fenológica de especies caducifolias es sensible a la variación interanual de las variables climáticas; por lo tanto, se considera como un indicador del cambio en el clima en los bosques (Elmore *et al.* 2016). Sin embargo, la fenología de especies perenes resulta difícil de monitorear en comparación con la fenología de árboles caducifolios. Una de las razones es que los cambios en la actividad fotosintéticamente activa son menos evidentes pues el árbol permanece verde casi todo el año incluso durante la temporada de letargo. Sin embargo, cuando aparecen brotes foliares nuevos estos representan solo una pequeña parte de la biomasa verde (Jönsson *et al.* 2010). Así mismo, la actividad fotosintética disminuye como respuesta a la baja demanda de carbohidratos. Estos cambios en la eficiencia de la fotosíntesis no son perceptibles para el ojo humano, pero están relacionados con otros

fenómenos como la aglomeración de cloroplastos, las modificaciones en la membrana de la célula (por ejemplo, el incremento en la concentración de lignina en la pared celular) o la deshidratación de las células (Jönsson *et al.* 2010). En otras ocasiones se relaciona con la formación de hielo dentro de las células en bosques boreales y con cambios en la absorción y reflectancia de la luz. Estos cambios pueden ser detectados por los sensores remotos utilizando diferentes longitudes de onda fuera del rango del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI por sus siglas en inglés (Jönsson *et al.* 2010).

Las mediciones continuas de la fenología y de los índices de vegetación (IV) derivados de imágenes satelitales pueden ser útiles para identificar la sensibilidad de los bosques a los cambios estacionales. El uso de la percepción remota es una herramienta que provee información espacial y temporal de la respuesta espectral de los bosques. Estos datos son obtenidos a partir del cálculo de diferentes índices de vegetación como el NDVI (Jönsson *et al.* 2010). Otras herramientas como drones, cámaras digitales (PhenoCams) o torres de flujo han sido utilizadas para el monitoreo de los bosques permitiendo mejorar nuestro entendimiento sobre la respuesta de los ecosistemas ante las variables climáticas (Gray y Ewers, 2021).

Escalas en el monitoreo fenológico

El monitoreo de organismos individuales permite desarrollar modelos que ayudan a predecir las condiciones fenológicas y climáticas estacionales (Elmore *et al.* 2016). La mejor forma para detectar estas condiciones es a través del registro fenológico a largo plazo, cubriendo diferentes especies de plantas y distribuidas geográficamente en una amplia escala espacial (Denny *et al.* 2014). Sin embargo, los protocolos de observación en superficie deben ser

mejorados y estandarizados con el fin de realizar comparaciones entre diferentes sitios y especies (Denny *et al.* 2014).

La ciencia ciudadana o voluntarios interesados en el monitoreo para contribuir a la ciencia, ha ayudado a nuestro entendimiento sobre los efectos la variabilidad climática en los ecosistemas (Beaubien y Hamann, 2011). El desarrollo de diferentes redes de observación fenológicas en el mundo como la USA-National Phenology Network (Schwartz *et al.* 2012), la European Phenology Network (van Vliet *et al.* 2003) o Alberta Plant Watch en Canadá (Beaubien y Hamann, 2011) han contribuido a la generación de datos fenológicos útiles para el análisis de los cambios en los ciclos de vida de los organismos (fenología) (van Vliet *et al.* 2003; Beaubien y Hamann, 2011).

Los datos obtenidos a través de la observación fenológica han generado información crítica necesaria para comprender problemáticas relacionadas con los requerimientos ambientales y climáticos de las plantas (Schwartz *et al.* 2012) y han mejorado nuestro entendimiento sobre los efectos de las variaciones climáticas en los ecosistemas (Beaubien y Hamann, 2011). Algunos ejemplos son los estudios realizados por Chmielewski y colaboradores (2003) sobre tendencias en la fenología de frutales y cultivos en Alemania a causa de los cambios en el clima o los estudios realizados por Wielgolaski *et al.* (2011) donde analizaron la variación de la fenología en especies presentes en Noruega relacionada con la temperatura. Ambos estudios identificaron la aparición temprana de las fenofases debido a los aumentos en la temperatura. Los autores determinaron que estos aumentos en la temperatura han originado adelantos en la aparición de las fases fenológicas de primavera, principalmente de la floración.

INTRODUCCIÓN

El uso de la percepción remota para evaluar la fenología de la superficie terrestre ha sido relacionado con un gran número de funciones de los ecosistemas, se ha utilizado para investigar la respuesta fenológica de la vegetación a las variaciones climáticas, así como para comprender las interacciones tierra-atmósfera (Shen *et al.* 2014). Los índices de vegetación se basan en valores digitales de “brillo” o reflectancia, que intentan medir la cantidad (radiancia) o proporción (reflectancia) de la luz que es reflejada por una cubierta; en este caso, vegetal. Un índice de vegetación se conforma por la combinación de diferentes valores espectrales que son sumados, multiplicados o divididos con el fin de obtener un solo valor que indique la cantidad o el vigor de la vegetación dentro de un píxel. Los valores altos de IV se refieren a porciones de vegetación en buen estado de salud (Campbell y Wynne, 2011). Los IV y otros parámetros biofísicos como el índice de área foliar son utilizados a menudo para describir algunos procesos de la superficie terrestre; mientras que, los parámetros fenológicos como el inicio o fin de la estación de crecimiento que se derivan de series de tiempo de imágenes satelitales son utilizados para el monitoreo ecológico del ambiente (Colditz, 2014). Por medio del análisis de datos de satélite se ha monitoreado la “salud” o las condiciones de la vegetación. Uno de los índices de vegetación más usados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI; Rouse *et al.* 1974; Jönsson *et al.* 2010). El NDVI mide el verdor de la vegetación y está relacionado con la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (Jönsson *et al.* 2010). El NDVI es una medida de cómo las plantas absorben y reflejan la luz entre los rangos de radiación infrarroja cercana y roja (NASA, 2016). El NDVI ha sido aplicado para el monitoreo de los eventos fenológicos de primavera en grandes áreas geográficas (Jönsson *et al.* 2010)

Otro de los índices de vegetación más usados es el Índice de Vegetación Mejorado (EVI por sus siglas en inglés). Este índice ha sido capaz de detectar los cambios en la actividad fotosintética del dosel en sitios con muchos cambios en el verdor. El comportamiento del EVI para la mayoría de los tipos de vegetación está relacionado con el desarrollo del dosel, lo cual ocurre generalmente antes de la fotosíntesis durante la primavera y persiste hasta después de la senescencia en el otoño (Shen *et al.* 2014).

Planteamiento del problema

Gracias al desarrollo de redes de científicos ciudadanos alrededor del mundo se han generado datos fenológicos que han contribuido para el análisis y entendimiento de los cambios en los ciclos de vida de los organismos (van Vliet *et al.* 2003; Beaubien y Hamann, 2011).

En el caso de México, el desarrollo de estas redes de monitoreo ha sido limitado a pesar de la existencia de iniciativas como el Programa Especial de Cambio Climático (DOF, 2009), la Estrategia Nacional de Cambio Climático (SEMARNAT, 2013) y la Ley General de Cambio Climático (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012) en las que se ha propuesto al monitoreo de la fenología como una alternativa para hacer frente a los efectos del clima cambiante. Sin embargo, los datos generados en superficie aún son insuficientes para identificar patrones de cambio en las especies vegetales. A pesar de que se sabe que el clima es uno de los principales moduladores de la variación fenológica de las especies, no se conoce a ciencia cierta la respuesta ecológica y la importancia social de estos cambios (Schwartz *et al.* 2012). Tampoco existen datos suficientes de observación fenológica a escala local que provean de información sobre la respuesta de la vegetación a los elementos del clima, pues la mayoría de los estudios de monitoreo se han limitado a escalas temporales muy cortas, para zonas muy específicas o para especies particulares (Galicia *et al.* 2014). En

México, al igual que en otros países (Frey y Kuenzer, 2015; Gessner *et al.* 2015; Lu *et al.* 2015; Beck *et al.* 2006) se han realizado algunos estudios sobre la aplicación de técnicas de percepción remota (Gómez, 2007; Colditz *et al.* 2009; Huete *et al.* 2011; Arriola, 2014; Galicia *et al.* 2014) para complementar el entendimiento sobre el funcionamiento y respuesta de los ecosistemas a las variables climáticas (Hostert *et al.* 2015). Estos estudios se han enfocado en comprender la dinámica estacional de la vegetación, sin realizar una comparación y validación con datos fenológicos en campo. En el mundo se han realizado validaciones de este tipo en Estados Unidos principalmente, pero también en China, Canadá, Japón, Corea, Alemania, Finlandia y Brasil (Reyes *et al.* 2021). En el caso de México, solamente un estudio de este tipo se ha documentado y su objetivo fue comparar las mediciones de la fracción del dosel a partir de la fotografía digital *in situ* e imágenes de satélite en la Península de Yucatán (Cuba *et al.* 2018). Por lo tanto, es necesario validar este tipo información con datos fenológicos recabados directamente en campo, ya sea por medio de ciencia ciudadana, observaciones producto de investigaciones académicas o imágenes provenientes de cámaras digitales de repetición o phenocams. Estas validaciones permiten identificar si el uso de imágenes satelitales caracteriza con precisión el ciclo fenológico de las especies de bosque templado y a su vez generar datos fenológicos a escala regional con una alta confiabilidad. Así mismo, la información generada por medio de percepción remota que ha sido validada con anterioridad permitiría llenar vacíos de información dadas las limitantes espaciales y temporales que presenta el monitoreo fenológico por medio de observaciones en campo.

Ante este panorama en este trabajo de tesis se han planteado las siguientes preguntas de investigación. ¿Cuál es el panorama actual respecto a la aplicación del monitoreo fenológico

transescalar en México y el mundo? ¿Cómo es el comportamiento fenológico de la vegetación a escala local y regional en los bosques templados de las áreas protegidas del Cinturón Volcánico Transmexicano? ¿El uso de la percepción remota es capaz de caracterizar con precisión el ciclo fenológico de la vegetación? ¿Puede el uso de la percepción remota ser una alternativa confiable para generar información fenológica ante la falta de datos a escala local?

Justificación

La evaluación de los efectos de la variabilidad del clima sobre la biodiversidad requiere la integración de distintos métodos de monitoreo en un amplio rango de escalas. A pesar de que cada uno provee de un tipo diferente de información, es útil para fortalecer el conocimiento sobre la vulnerabilidad, exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y conservación de los ecosistemas (Dawson *et al.* 2011).

Gracias a la alta sensibilidad de la vegetación ante los cambios en las variables ambientales (Richardson *et al.* 2013) y a los pocos insumos económicos y materiales para llevar a cabo su monitoreo, la observación de la fenología ha recibido en los últimos años una creciente atención como un “bio-indicador” de la respuesta de la vegetación ante las condiciones climáticas de su entorno (Menzel, 2003). Los datos obtenidos a través de la observación fenológica han generado información crítica necesaria para comprender los requerimientos ambientales y climáticos de las plantas (Schwartz *et al.* 2012).

El uso de la información que proveen algunos satélites también ha permitido identificar los cambios en la fenología de los ecosistemas a través del análisis de series de tiempo más extensas (Dietrich, 2015). Esto se traduce en una poderosa herramienta de monitoreo de esos

cambios, capaz de revelar la dinámica de la vegetación a largo plazo, analizar la magnitud de esa dinámica (Kuenzer *et al.* 2015) y como una alternativa para complementar la falta de datos a escala local o regional.

Sitios de estudio

La delimitación de ecorregiones permite identificar la distribución de una amplia gama de flora y fauna a lo largo del planeta en diferentes escalas espaciales (Olson *et al.* 2001). Una ecorregión se define como una unidad geográfica con condiciones de flora y fauna características (CONABIO, 2012a); se consideran incluso las condiciones climatológicas, geológicas y edafológicas similares (Challenger y Soberón 2008). Son divisiones de grandes zonas biogeográficas sin respetar divisiones políticas estatales, municipales o nacionales. Desde el punto de vista de Olson y colaboradores (2001) una ecorregión es vista como una unidad de tierra relativamente grande que alberga comunidades naturales y especies características. Los límites de una ecorregión se aproximan a la extensión original de las comunidades naturales antes de presentar cambios significativos en el uso de suelo. En el mundo se han caracterizado 867 ecorregiones terrestres; mientras que, el territorio mexicano se ha dividido en siete ecorregiones nivel I, 22 de nivel II y 51 ecorregiones de nivel III (CONABIO, 2012a). Dentro de las divisiones del territorio mexicano en ecorregiones de nivel II se encuentran las sierras templadas, las cuales comprenden la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre Centroamericana y Altos de Chiapas y el Sistema Neovolcánico Transversal.

El Sistema Neovolcánico Transversal o Cinturón Volcánico Transmexicano es una cordillera con una extensión de 900 km y una anchura promedio de 130 km. Se extiende desde Nayarit

hasta Veracruz, haciendo contacto al oeste con la Sierra Madre Occidental y al este con la Sierra Madre Oriental (SGM, 2017).

Dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano se localizan las áreas protegidas de estudio propuestas para esta investigación. Estas áreas son: La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) y el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT; Figura II).

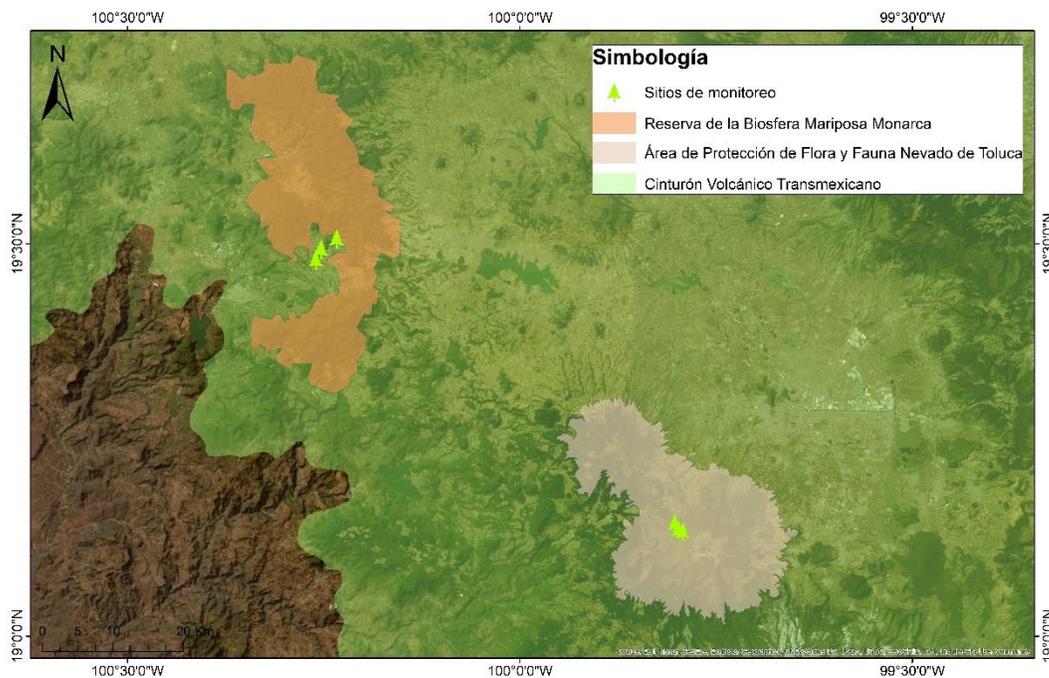


Figura II. Ubicación de los sitios de monitoreo fenológico en las áreas naturales protegidas.

Elaboración propia con base en CONANP, 2019; CONANP, 2022 e INEGI, 2007

Con una extensión de 56,259 ha, la RBMM está localizada entre los estados de México y Michoacán; abarca los municipios de Donato Guerra, San José del Rincón, Temascalcingo, Villa de Allende estos pertenecientes al Estado de México y Angangueo, Aporo, Contepec,

Ocampo, Senguio y Zitácuaro, los cuales forman parte del estado de Michoacán. La RBMM está dividida en tres áreas núcleo que cubren una extensión de 13,552 ha y dos zonas de amortiguamiento con una superficie de 42,707 ha (CONANP, 2001). Los bosques de coníferas son el tipo de vegetación más abundante en la zona núcleo de la reserva (Cornejo *et al.* 2003). El bosque de oyamel ocupa la mayor extensión en esta zona y géneros como *Quercus*, *Alnus*, *Arbutus*, *Salix* y *Prunus* se distribuyen en menor superficie, principalmente en las laderas (CONANP, 2001).

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca se ubica en los municipios de Almoloya de Juárez, Amanalco, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec en el Estado de México y tiene una superficie de 53,590 hectáreas (DOF, 2016). La composición biológica del Nevado de Toluca es producto de la combinación de elementos como el relieve, la altitud, su posición geográfica además de las características geológicas, edáficas y climáticas de la zona. En esta área protegida se desarrollan bosques de pino (*Pinus*), oyamel (*Abies religiosa*), encino (*Quercus*), pino-encino (*Pinus-Quercus*), oyamel-pino (*Abies-Pinus*), además de pastizal o zacatonal alpina (CONANP, 2016).

Objetivos

Objetivo general

Comprobar si el uso de técnicas de percepción remota caracteriza de manera similar a lo observado *in situ* el ciclo fenológico de las especies de bosque templado en áreas naturales protegidas del Cinturón Volcánico Transmexicano.

Objetivos particulares

- Caracterizar la respuesta fenológica de la vegetación a escala local mediante observaciones en campo en las áreas protegidas analizadas
- Caracterizar la respuesta fenológica de la vegetación a escala regional mediante imágenes satelitales de la zona de estudio
- Comparar la respuesta de la vegetación en ambas escalas de estudio
- Generar un índice de vegetación adecuado a los bosques templados del Cinturón Volcánico Transmexicano

Hipótesis

El monitoreo fenológico de la vegetación a partir de técnicas de percepción remota utilizando imágenes satelitales arroja resultados similares a lo observado *in situ*. De esta manera, la información fenológica generada por medio de imágenes satelitales puede ser utilizada con una alta confiabilidad para llenar vacíos de información dada la falta de datos a escala local.

Referencias

- Alaback P (1991) Comparative ecology of temperate rainforests of the Americas along analogous climatic gradients. *Revista Chilena de Historia Natural* 64: 399-412.
- Alfaro T, Retana J, Arasa R, Vayreda J, Martínez J (2020) Recent dynamics of pine and oak forest in Mexico. *European Journal of Forest Research* 139: 179-187. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01258-8>
- Arriola V (2014) Respuesta de la vegetación a la variabilidad climática y sus implicaciones en la conservación del bosque templado en la Sierra Madre Oriental. Tesis de licenciatura, México, Universidad Nacional Autónoma de México
- Beaubien E, Hamman A (2011). Plant phenology networks of citizen scientists: recommendations from two decades of experience in Canada. *International Journal of Biometeorology* 55: 833-841. <http://doi.org/10.1007/s00484-011-0457-y>
- Beck P, Jönsson P, Hogda K, Karlsen S, Eklundh L, Skidmore A (2006) A ground validated NDVI dataset for monitoring dynamics and mapping phenology in Fennoscandia and the Kola peninsula. *International Journal of Remote Sensing*. 28(19): 4311-4330. <https://doi.org/10.1080/01431160701241936>

- Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión (2012) Ley General de Cambio Climático. México
- Campbell J, Wynne R (2011) Introduction to remote sensing. Guilford Press. Pp. 637
- Challenger A, Soberón J (2008). Los ecosistemas terrestres, en Capital natural de México, vol. I; Conocimiento actual de la biodiversidad, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 87-108
- Chmielewski F, Müller A, Brunsl E (2003) Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-200. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(2004): 69-78. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00161-8)
- Colditz R (2014) On the day of observation in image composites and its impact on time series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7(8): 3350-3357
- Colditz R, López G, Maeda P, Cruz I, Ressler R (2009) Phenology and phenological variability of Mexican ecosystems. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/1038-1041>. 10.1109/IGARSS.2009.5417567
- CONABIO (2012a) Ecorregiones terrestres [En línea] Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/ecorregiones.html> [Accesado el 18 de febrero de 2021]
- CONABIO (2012b) Bosques templados [En línea]. Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado> [Accesado el 18 de febrero de 2021]
- CONANP (2016) Programa de manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 317
- CONANP (2019) Zonificación primaria [En línea], disponible en: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm [Accesado el 28 de enero de 2022]
- CONANP (2022) Áreas Naturales Protegidas [En línea], disponible en: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm [Accesado el 28 de enero de 2022]
- CONANP, (2001) Plan de manejo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Enero de 2001, México pp. 138.
- Cornejo G, Casas A, Farfán B, Villaseñor J, Ibarra G (2003) Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 73(2003): 43-62
- Cuba N, Rogan J, Lawrence D, Williams C (2018) Cross-scale correlation between in situ measurements of canopy gap fraction and landsat-derived vegetation indices with implications for monitoring the seasonal phenology in tropical forests using MODIS data. *Remote Sensing* 10(7): 1:21. <https://doi.org/10.3390/rs10070979>

- Dawson T, Jackson S, House J, Colin I, Mace G (2011) Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science* 332(6025): 53-58. <https://doi.org/10.1126/science.1200303>
- del Val E, Sáenz C (2017) Insectos descortezadores (coleoptera: curculionidae) y cambio climático; problemática actual y perspectivas en los bosques templados. *Revista Especializada de Ciencias Biológicas* 20(2): <https://doi.org/53-60>. 10.1016/j.recqb.2017.04.006
- Denny E, Gerst K, Miller A, Tierney G, Crimmins T, Enquist C, Guertin P, Rosemartin A, Schwartz M, Thomas K, Weltzin J (2014) Standardized phenology monitoring methods to track plant and animal activity for science and resource management applications. *International Journal of Biometeorology* 58(4):591-601. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0789-5>
- Dietrich (2015) Foreword en Kuenzer, C., Dech, S. y W. Wagner (comp.) *Remote Sensing time series revealing land surfaces and dynamics*. Suiza. Pp. V
- DOF (2009) Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 [En línea] Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales, México, pp. 98
- DOF (2016) Acuerdo por el que se da a conocer el Resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca [En línea]. Disponible en http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5457780&fecha=21/10/2016 [Accesado el 18 de febrero de 2021]
- Dollfus O (1976) El espacio geográfico. Barcelona, España. Pp. 124
- Donnelly A, Caffarra A, O'Neil B (2011) A review of climate-driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *International Journal of Biometeorology* 55(2011): 805-817. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0426-5>
- Elmore A, Stylinski C, Pradhan K (2016). Synergistic use of citizen science and remote sensing for continental-scale measurements of forest tree phenology. *Remote Sensing* 8(502): 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs8060502>
- FAO (2021) Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Frey C y Kuenzer C (2015) “Analysing a 13 years MODIS land Surface temperatura time series in the Mekong Basin” en Kuenzer C, Dech S, Wagner W (comp.) *Remote Sensing time series revealing land surfaces and dynamics*. Suiza. Pp. 119-139
- Galicia L, Chávez B, Kolb M, Jasso R, Rodríguez L, Solís E, Guerra V, Pérez E, Villanueva A (2018) Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques* 24(2): 1-18. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443>

- Galicia L, Cuevas M, González L, Couturier S (2014) Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*. (39)6: 368-374
- García R (2006) Sistemas complejos. Concepto, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Editorial Gedisa. Pp. 201.
- Gessner U, Knauer K, Kuenzer C, Dech S (2015) Land Surface phenology in a west African savanna: impact of land use, land cover and fire en Kuenzer, C., Dech, S. y W. Wagner (comp.) *Remote Sensing time series revealing land surfaces and dynamics*. Suiza. Pp.203-223
- Gilliam (2016) Forest ecosystems of temperate climatic regions: from ancient use to climate change. *New Phytologist* (2016) 212: 871-887. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.14255>
- Gómez L (2007) Variabilidad climática y cambio de uso de suelo en la Sierra Norte de Oaxaca: implicaciones en los escenarios de cambio climático. Tesis de Doctorado. México. Universidad Nacional Autónoma de México
- Graham A (2011) The age and diversification of terrestrial New World ecosystems through Cretaceous and Cenozoic time. *American Journal of Botany* 98: 336-351.
- Granados D, López G y Hernández M (2007) Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(1):67-83
- Gray R y Ewers R (2021) Monitoring Forest Phenology in a Changing World. *Forest* 2021(12): 1-24. <https://doi.org/10.3390/f12030297>
- Hannah L (2022) “Phenology: Changes in timing of biological events due to climate change” en Hannah L (autor) *Climate Change Biology*. Tercera edición. Pp. 143-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102975-6.00007-8>
- Hoegh O, Jacob D, Taylor M, Bindi M, Brown S, Camilloni I, Diedhiou A, Djalante R, Ebi K, Engebrecht F, Guiot J, Hijikata Y, Mehrotra S, Payne A, Seneviratne S, Thomas A, Warren R, Zhou G (2018) Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. En *Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*
- Hostert P, Griffiths P, van der Linden S, Pflugmacher D (2015) “Time series in a new era of optical satellite data” en Kuenzer, C., Dech, S. y W. Wagner (comp.) *Remote Sensing time series revealing land surfaces and dynamics*. Suiza. Pp. 25-41
- Huete A, Solano R, Gleen E, Restrepo N (2011) Monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos con índices de vegetación MODIS en Francois, J. (Coord.) *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México, D.F. Pp. 195-229
- INEGI (2007) Ecorregiones terrestres de México. Escala 1:1,000,000 [En línea]. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Accesado el 22 de enero de 2022]

- Jönsson A, Eklundh L, Hellström M, Barring L, Jönsson P (2010) Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forest in relation to snow dynamic and tree phenology. *Remote Sensing of Environment* 114(2010): 2719-2730. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.06.005>
- Kuenzer C, Dech S, Wagner W (2015) Remote sensing time series revealing land surface dynamics: status quo and the pathway ahead en Kuenzer C, Dech S, Wagner W (comp.) *Remote Sensing time series revealing land surfaces and dynamics*. Suiza. Pp.1-23
- Lu L, Guo H, Wang C (2015) Land Surface phenology monitoring with sea winds scatterometer time series in Easter Asia en Kuenzer C, Dech S, Wagner W (comp.) *Remote Sensing time series revealing land surfaces and dynamics*. Suiza. Pp. 383-401
- McGlone MS, Buitenwerf R, Richardson S (2016) The formation of the oceanic temperate forests of New Zealand. New Zealand. *Journal of Botany* 54: 128-155.
- Mendoza (2011) Introducción a la Geografía. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Filosofía y Letras, Departamento de Geografía. Pp. 13-25.
- Menzel A (2003) Plant phenological “fingerprints” en Schwartz, M. (Editor) *Phenology: an integrative environmental science*. Estados Unidos de América. Pp. 319-329
- NASA (2016) Tracking deer habitat by satellite [En línea]. Disponible en: <http://terra.nasa.gov/> [Accesado el 19 de abril de 2016]
- Olson D, Dinerstein E, Wikramanayake E, Burgess N, Powell G, Underwood E, D'amico J, Itoua I, Strand J, Morrison J, Loucks C, Allnut T, Ricketts T, Kura Y, Lamoreux J, Wettengel W, Hedao P, Kassem K (2001) Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience* 51(11):933–938, [https://doi.org/10.1641/00063568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/00063568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- Prevéy J, Parker L, Harrington C (2019) Projected impacts of climate change on the range and phenology of three culturally important shrub species. *Plos One* 15(5): 1-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232537>
- Primack R, Higuchi H, Miller A (2009) The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan. *Biological Conservation* 142(9): 1943-1949. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.03.016>
- Reyes E, Gómez L, Barradas V, Terán A (2021) Cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems: a content-analysis-based review. *International Journal of Biometeorology* (2021)65: 2215-2227. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02173-2>
- Richardson A, Keenan T, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M (2013) Climate change, phenology, and control of vegetation feedbacks to the climate system. *International Journal of Biometeorology* 169(2015): 156-173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>

- Rosemartin A, Crimmins T, Enquist C, Gerst K, Kellermann J, Posthumus E, Denny E, Guertin P, Marsh L, Weltzin J (2013) Organizing phenological data resources to inform natural resource conservation. *Journal Biological Conservation* 173(2014): 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.07.003>
- Rouse J, Haas R, Schell J, Deering D (1974) Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1. Symposium, Greenbelt NASA
- Santarelli S y Campos M (2002) Corrientes epistemológicas, metodología y prácticas en geografía. Propuestas de estudio en el espacio local. Universidad Nacional del Sur, Argentina. Pp. 296.
- Schwartz M (2003) Introduction en Schwartz M (Editor) *Phenology: an integrative environmental science*. Estados Unidos de América. Pp. 3-9
- Schwartz M, Betancourt J, Weltzin J (2012) From Carprió's lilacs to de USA National Phenology Network. *Frontiers in ecology and the environment*. (10)6: 324-327. <https://doi.org/10.1890/110281>
- SEMARNAT (2013) Estrategia Nacional de Cambio Climático. México
- SGM (2017) Volcanes de México [En línea]. Disponible en <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Volcanes-de-Mexico.html> [Accesado el 23 de marzo de 2021]
- Shen M, Tang Y, Desai A, Gough Ch, Chen J (2014) Can EVI-derived land-surface phenology be used as a surrogate for phenology of canopy photosynthesis? *International Journal of Remote Sensing* 35(3): 1162-1174. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.875636>
- van Vliet A, de Groot R, Bellens Y, Braun P, Bruegger R, Bruns E, Clevers J, Estreguil Ch, Flechsig M, Jeanneret F, Maggi M, Martens P, Menne B, Menzel A, Sparks T (2003). The European Phenology Network. *International Journal of Biometeorology* 47: 202-212. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0174-2>
- Wielgolaski F, Nordli O, Rune S, O'Neill B (2011) Plant phenological variation related to temperature in Norway during the period 1928-1977. *International Journal of Biometeorology* 55(2011): 819-830. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-011-0467-9>
- Xiang Q, Soltis D, Soltis P, Manchester S, Crawford D (2000). Timing the Eastern Asian-Eastern North American floristic disjunction: molecular clock corroborates paleontological estimates. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 15: 462-472.

CAPÍTULO I. MÉTODOS

El monitoreo fenológico transescalar conlleva la combinación de datos generados por medio de percepción remota y recabados en campo. Alrededor del mundo se han llevado a cabo estudios transescalares aplicados a diferentes tipos de ecosistemas. En este trabajo, se realizó una revisión del estado del arte sobre este tipo de monitoreo fenológico en los ecosistemas forestales de nuestro planeta. Se investigaron los principales índices de vegetación utilizados, las herramientas de monitoreo *in situ* y las principales fases fenológicas monitoreadas. Dentro de este monitoreo fenológico transescalar, se sabe que los datos fenológicos obtenidos en campo; son esenciales para validar la respuesta de la vegetación caracterizada por medio de percepción remota. Con este fin, se presenta la metodología general utilizada para recabar información fenológica *in situ* de las principales especies presentes en las áreas naturales protegidas objeto de estudio de esta investigación. El trabajo de campo permitió caracterizar el ciclo fenológico de especies del género *Pinus* y *Alnus* para el periodo de mayo 2018 a junio 2019. En el caso de la información fenológica de los individuos del género *Alnus*, fue combinada con datos de temperatura y precipitación. Por otro lado, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI para conocer el comportamiento fenológico anual de la vegetación de estos bosques templados mediante del uso de imágenes Sentinel-2. Además, se propone un nuevo índice de vegetación (Normalized Difference Evergreen Vegetation Index) basado en las características de las especies presentes en el sitio de estudio. Finalmente, se realizó la comparación y validación de la fenología obtenida por medio de imágenes satelitales con los datos recabados en los sitios de estudio. A continuación, se presenta de manera resumida la metodología general utilizada para el desarrollo de este trabajo (Figura I.1). La metodología extensa puede ser consultada en cada capítulo de esta tesis.

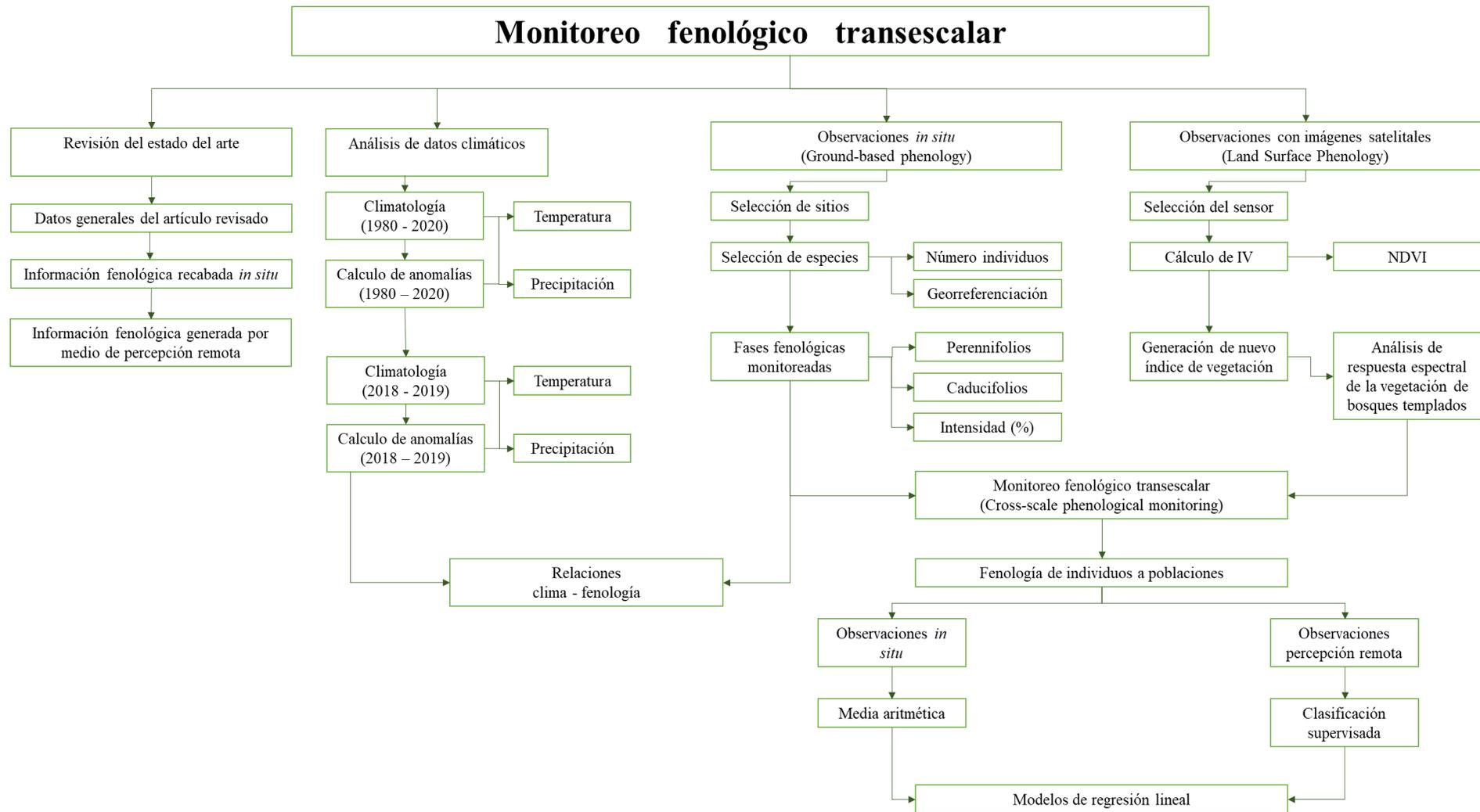


Figura I. 1 Diagrama metodológico

I.1 Revisión del estado del arte

Con el fin de obtener una visión más amplia sobre el uso, aplicación y avances en el monitoreo transescalar en ecosistemas forestales alrededor del mundo, se llevó a cabo una revisión de la literatura científica sobre este tema. Se utilizó la plataforma “Scopus” (www.scopus.com) para realizar la búsqueda de los artículos científicos, utilizando palabras clave referentes al tema de interés. Se aplicaron distintos filtros para lograr mejores resultados, descartando capítulos de libros, artículos relacionados con otros ecosistemas distintos a los ecosistemas forestales y aquellos en donde no se combinaran dos métodos de monitoreo fenológico (percepción remota y observaciones *in situ*). Se consideraron únicamente trabajos realizados entre los años 2000 a 2018 y escritos en idioma inglés.

I.2 Análisis de datos climatológicos

El análisis de la climatología fue aplicado en el capítulo III de este trabajo. Los datos fueron obtenidos a través de la plataforma <https://daymet.ornl.gov/>. Se calculó la climatología general del sitio de estudio para el periodo de 1980 a 2020; así como la climatología y anomalías para cada uno de los años del mismo periodo. Se identificaron las variaciones anuales de la temperatura y la precipitación, así como los años húmedos, secos, cálidos y fríos desde 1980 a 2020.

I.3 Monitoreo fenológico por medio de observaciones en superficie

Durante los meses de mayo de 2018 a junio de 2019 se llevó a cabo el monitoreo *in situ* de las especies presentes en tres áreas naturales protegidas de bosque templado. Estas áreas protegidas fueron la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y el Área Destinada Voluntariamente a la Conservación Santuario de las Luciérnagas. Se identificó la especie dominante, se

determinó el número de individuos a monitorear y se definieron las fases fenológicas a registrar dependiendo de las características de la vegetación (perennes o caducifolias).

I.3.1 Selección y ubicación de los sitios de monitoreo

Los inicios del monitoreo fenológico comunitario impulsado por el Colegio de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México tienen sus orígenes en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (Reyes, 2013; Reyes, 2016). En esta región se ha llevado a cabo el registro de especies de importancia local desde el año 2013 hasta la fecha. Gracias al monitoreo por medio de ciencia ciudadana se logró caracterizar la respuesta fenológica de cultivos, frutales y especies forestales que forman parte de los bosques templados de la reserva. Se dio seguimiento a los sitios de monitoreo dentro de los bosques de la RBMM y se continuó esta línea de investigación eligiendo dos sitios más para realizar el seguimiento fenológico de especies características de este tipo de ecosistema. Estos sitios se encuentran dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano; una ecorregión nivel II dominada por bosques templados de coníferas principalmente.

El primer sitio de monitoreo se ubicó en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. En esta ANP los sitios de monitoreo fenológico fueron establecidos desde el año 2013 y coincidieron con puntos de monitoreo de calidad del agua. El monitoreo de calidad del agua es un programa llevado a cabo por la organización Alternare, A. C (Alternare, A. C., 2015). Gracias a la colaboración interinstitucional (UNAM-Alternare, A. C.) se logró establecer en estos mismos sitios los puntos de monitoreo fenológico. Este acuerdo aseguró las visitas mensuales y salvaguardar la seguridad del personal en campo al contar con el apoyo de las comunidades locales, además de contar con los medios de transporte para visitar cada uno de los sitios de monitoreo. Los resultados de estos monitoreos previos se pueden consultar en Reyes (2013 y 2016).

El segundo sitio se ubicó en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca gracias al conocimiento previo que ya se tenía del Área del Nevado de Toluca en trabajos sobre reforestación (Reyes *et al.* 2019) y a las facilidades otorgadas por el personal encargado del Parque de los Venados se decidió establecer en este lugar nuevos sitios de monitoreo de especies de bosque templado. Los puntos de monitoreo seleccionados intentaron considerar la diversidad de especies presentes en esta región; además de identificar especies en común con la RBMM. Este último objetivo no fue posible debido a que las especies que habitan en ambas áreas protegidas son distintas. Por lo anterior se identificaron aquellas especies propias del APFFNT y en cada sitio de monitoreo se determinó la especie dominante.

La disposición y apoyo de las comunidades locales en cada ANP fueron pieza clave para el establecimiento, seguimiento, acceso y en algunas ocasiones el registro fenológico *in situ*. En cada una de las ANP, se seleccionaron sitios de monitoreo fenológico en los cuales la vegetación fueran indicativa o característica del tipo de ecosistema. Se priorizó que el estado de conservación de cada sitio fuera el óptimo evitando en la medida de lo posible sitios perturbados por actividades humanas.

I.3.2 Selección de las especies

Una vez elegidos los sitios de monitoreo, en cada uno de los puntos se determinó la diversidad de especies arbóreas presentes en cada lugar. Al mismo tiempo se identificó la especie dominante en cada sitio de observación y se comprobó que existieran al menos cinco individuos de cada especie. Lo anterior se basó en los protocolos establecidos por la USA-National Phenology Network (2013) donde especifica que, para investigaciones científicas es preferible seleccionar entre tres y cinco individuos de la misma especie. Se comprobó que todos los individuos que formaron parte del universo de estudio estuvieran

CAPÍTULO I. MÉTODOS

visiblemente “saludables”; es decir, libres de enfermedades o plagas (USA-NPN, 2013). Además, se intentó que tuvieran características similares de altura. Los árboles seleccionados fueron marcados para su fácil identificación durante las visitas futuras (Figura I.2a). Finalmente, cada uno de los individuos monitoreados fueron georreferenciados (Figura I.2b y Tabla 1).



Figura I.2 Ejemplo de a) señalización de *Alnus jorullensis* y; b) geoposicionamiento de *Cupresus lusitanica* durante en trabajo de campo en el APFFNT

Tabla I.1 Sitios de monitoreo, especies e individuos monitoreados en cada área natural protegida

Área Natural Protegida	Estado	Municipio	Sitio	Especie	Nombre común	N° individuos	Total de Individuos por sitio	Coordenadas centrales del sitio		
								Latitud	Longitud	Altitud
Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca	Michoacán de Ocampo	Zitácuaro	La Entrada	<i>Alnus acuminata</i>	Aile	10	10	19°30'23.83"N	100°14'0.39"O	2497
Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca	Estado de México	Zinacantepec	Sitio 1	<i>Pinus hartwegii</i>	Pino de las alturas	10	30	19° 8'6.04"N	99°47'41.23"O	3743
			Sitio 2	<i>Pinus hartwegii</i>	Pino de las alturas	20		19° 8'11.78"N	99°47'43.32"O	3760

I.3.3 Fases fenológicas monitoreadas

Con base los protocolos de observación de la USA-NPN (2013) y el trabajo realizado por Cortés *et al.* (2011) y la escala fenológica BBCH (Meier, 2001) se determinaron las fases fenológicas monitoreadas dependiendo del tipo de vegetación. Estas fases fenológicas fueron generadas para especies de coníferas (Figura I.3a) y latifoliadas (Figura I.3b).



Figura I.3 Ejemplo de la fenofase “Desarrollo de hojas” en *Pinus hartwegii* y *Alnus acuminata*

Una vez identificada y registrada la fase o fases fenológicas, se registró también la intensidad expresada en porcentaje utilizando los valores del 5% al 100% en intervalos de cada 5% (Tabla I.2). Lo anterior representa una medida de la extensión o presencia de la fenofase en el individuo (Rosemartin, *et al.*, 2018).

Tabla I.2 Ejemplo de medida de la intensidad de las fenofases en un individuo de *Pinus hartwegii* en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca

Especie	Fecha de observación	Intensidad de la Fase fenológica (%)			Total
		Floración	Maduración de frutos y semillas	Hojas maduras y ramas	
<i>Pinus hartwegii</i>	22 marzo 2019	25	10	65	100

I.3.4 Frecuencia de monitoreo

Cada uno de los individuos seleccionados fueron monitoreados durante un año (junio 2018 a mayo 2019). Las observaciones se llevaron a cabo de manera mensual y realizándose en la medida de lo posible lo más cercanas al mismo día en que se realizaron el mes anterior.

I.4 Monitoreo fenológico por medio de percepción remota

Para comparar la respuesta de la vegetación con información fenológica en *in situ*, se recurrió al uso de imágenes satelitales y al cálculo de índices de vegetación. Lo anterior para comprobar si el comportamiento fenológico de las especies de bosque templado obtenido por medio de percepción remota es similar a lo observado durante el trabajo de campo. Corroborar esta información es necesaria para futuros trabajos en donde dada la falta de datos fenológicos *in situ* se pueda recurrir con una alta confiabilidad a la información derivada del monitoreo por medio de percepción remota.

I.4.1 Selección del sensor remoto

CAPÍTULO I. MÉTODOS

Debido a las características (resolución espacial, temporal y espectral) de los satélites Sentinel-2, se seleccionaron como la herramienta para caracterizar la respuesta fenológica de la vegetación por medio de percepción remota.

El uso de una única imagen de SPOT-6 fue utilizada para identificar únicamente aquellos pixeles correspondientes a la vegetación objeto de estudio (*Pinus hartwegii*) en el APFFNT. Para realizar esta diferenciación de pixeles se recurrió a una clasificación supervisada utilizando el algoritmo de mínimas distancias.

I.4.2 Cálculo de índices de vegetación

Con el objetivo de caracterizar el ciclo fenológico de la vegetación presente en los bosques templados del centro de México, se recurrió al cálculo de índices de vegetación. Debido a que se trata de uno de los IV más utilizados alrededor del mundo (Reyes *et al.* 2021), se procedió al cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI por sus siglas en inglés.

El cálculo del NDVI fue realizado mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (1)$$

Dónde:

NIR= valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

Red= valores de reflectancia en la banda del rojo

I.4.3 Generación del Índice de Vegetación Normalizado de Bosques Perenes

CAPÍTULO I. MÉTODOS

La creación del Índice de Vegetación Normalizado de Bosques Perenes (Normalized Evergreen Forest Vegetation Index; NEFVI) tuvo como objetivo generar un índice capaz de caracterizar con precisión la respuesta fenológica de la vegetación perenne presente en los bosques templados.

La fórmula utilizada para el cálculo de este índice se muestra en la Ec 2.

$$NEFVI = \frac{Banda\ 8 - \frac{Banda\ 2 + Banda\ 4}{2}}{Banda\ 8 + \frac{Banda\ 2 + Banda\ 4}{2}} \quad (2)$$

I.5 De la fenología de individuos a la de poblaciones

A fin de comparar la fenología de cada uno de los individuos monitoreados en campo, con la información a nivel de píxeles de las imágenes satelitales, fue necesario realizar un “escalamiento” de la información obtenida en campo para comparar en escalas espaciales similares. Este proceso se basó en parte de la metodología propuesta por Liang *et al.* (2011). A pesar de que el trabajo de Liang y colaboradores (2011) se basó en el análisis de la fenología de un bosque mixto y no en bosques de coníferas como en el caso de esta tesis, su metodología es funcional para calcular la fenología de las poblaciones de árboles de la misma especie como en el caso de los individuos de *Pinus hartwegii* monitoreados en el APFFNT.

I.6 Comparación en ambas escalas de monitoreo

Una vez obtenida la fenología de poblaciones en ambas escalas de estudio, se generaron modelos de regresión lineal entre la intensidad de las fases monitoreadas y los IV para

identificar si la fenología generada por medio de percepción remota fue similar a la obtenida *in situ*.

Referencias

- Alternare A. C. (2015) Conservación de bosque y agua [En línea]. Disponible en <https://www.alternare.org/> [Accesado el 8 de febrero de 2022]
- Cortés J, Cornejo G, Ibarra G (2011) Fenología reproductiva de las especies arbóreas de un bosque neotropical. *Interciencia*. 36(8): 608-613
- Liang L, Schwartz M, Fei S (2011). Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment* 115: 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.013>
- Meier U (2001) Estudio de plantas mono y dicotiledóneas. BBCH monografía. [En línea] Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura, edición 2001, pp. 149. Disponible en: http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_veroeff/bbch/BBCH-Skala_spanisch.pdf [Accesado el 20 de junio de 2021]
- Reyes E (2013) Aplicación de un modelo de observación fenológica comunitaria para identificar tendencias del clima en el municipio Zitácuaro, Michoacán. Tesis de licenciatura. México, Universidad Nacional Autónoma de México
- Reyes E (2016) La observación fenológica comunitaria en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: una alternativa de adaptación ante el cambio climático. Tesis de maestría. México, Universidad Nacional Autónoma de México
- Reyes E, Gómez L, Barradas V, Terán A (2021) Cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems: a content-analysis-based review. *International Journal of Biometeorology* (2021)65: 2215-2227. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02173-2>
- Reyes E, Hernández G, Calvillo A (2019) Evaluación de la supervivencia en sitios reforestados como indicador de la restauración del paisaje en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. *Tlalli Revista de Investigación Geográfica* 2(2019): 97-117. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2019.2.1087>
- Rosemartin A, Denny E, Gerst K, Marsh L, Posthumus E, Crimmins T, Weltzin J (2018) USA National Phenology Network Observational Data Documentation. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1060, Pp. 24. <https://doi.org/10.3133/ofr20181060>
- USA-National Phenology Network (2013) USA National Phenology Network Plant and Animal Observation Handbook. USA---NPN Education & Engagement Series [En línea]. Disponible en www.usanpn.org. [Accesado el 12 de noviembre de 2021]

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

CAPÍTULO II

Cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems. A content-analysis-based review

Erika Rocío Reyes González^{1*}; Leticia Gómez Mendoza²; Víctor L. Barradas³; Ángel Refugio Terán Cuevas⁴

Manuscrito publicado en:

International Journal of Biometeorology (2021) 65: 2215-2227

<https://doi.org/10.1007/s00484-021-02173-2>

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Erika Rocío Reyes González^{1*}; Leticia Gómez Mendoza²; Víctor L. Barradas³; Ángel Refugio Terán Cuevas⁴

Cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems. A content-analysis-based review

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Geografía, Mexico City, Mexico

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Mexico City, Mexico

³Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología, Departamento de Ecología Funcional, Mexico City, Mexico

⁴Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Mexico City, Mexico

*Corresponding autor: Erika Rocío Reyes González e-mail: rossreyesgeo@gmail.com, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar S/N Torre de Humanidades 1 Piso 3 Cubículo 8 Teléfono (55) 56228222 ext 40855

Abstract

Phenology has been useful to better understand the climate-vegetation relationship, and it is considered an indicator of climate change impact. Phenological data have been generated through multiple remote sensing techniques and ground-based observations through professional or citizen science. The combination of both techniques is known as cross-scale phenological monitoring. However, no comparative analysis has been carried out to assess the advantages and disadvantages of each of these techniques to characterize the phenological cycle of forest ecosystem species. This work is a content-analysis-based review of scientific literature published between 2000 and 2018 related to cross-scale monitoring methods, to estimate the phenological variation in different forest ecosystems worldwide. For this study, 97 publications related to cross-scale phenological monitoring were selected. We found that 71% of the articles aimed to corroborate the data generated through satellite imagery using surface data from either phenocams, flux towers or from citizen science networks. More publications were published by authors in the United States (30%), Canada (8%), and China (7%). The most commonly used vegetation index was the normalized difference vegetation index (65%). Some deficiencies in the evaluation of the phenological phases of autumn when compared with surface observations were found. Flux towers and phenocams were included as alternatives for ground-based monitoring. Cross-scale phenological monitoring has the potential to characterize the phenological response of vegetation accurately due to data combinations at two different observation scales. This work contributes to specifying the methodologies used in gathering phenological parameters of the world's forest ecosystems.

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Keywords: forest ecosystems, phenology, vegetation index, ground-based monitoring, remote sensing

II.1 Introduction

Phenology is the study of recurring biological event timing that is the result of the species' adaptive response to biotic and abiotic influences, mainly of climate variation and the interrelations among phases of the same or different species (Lieth, 1974; Maignan *et al.* 2008; Hmimina *et al.* 2013; Ogunbadewa *et al.* 2014). Vegetation monitoring over long time series is essential to understand the biological processes of ecosystems (Ogunbadewa *et al.* 2014) through a systematic and continuous recording of events such as flowering, fruiting, leaf fall, and senescence (Soudani *et al.* 2012). Forest ecosystems are affected by human activities such as deforestation and the extension of the agricultural frontier. A forest ecosystem is a dynamic complex of plant, animal, and microorganism communities where trees are the dominant life form (United Nations, 2019). Forests provide goods, food, and other ecosystem services such as climate regulation. Therefore, it is necessary to generate environmental indicators that allow us to understand the response of these ecosystems to environmental change (Matthews *et al.* 2000).

To better understand the phenological cycles of forest ecosystem vegetation, it is necessary to have data for different species and data that cover large scales, both temporally and spatially. The systematic recording of phenological phases in plant species has been carried out by scientists and students (Elmore *et al.* 2016) with the objective of analyzing the response of vegetation to meteorological and climatic variables (Soudani *et al.* 2012; Sacardi *et al.* 2014; Czernecki *et al.* 2018). Phenological information has a wide range of applications, including diagnosing the response of ecosystems to global climate change and

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

reflecting changes in the start and end dates of the growing season (Ganguly *et al.* 2010; Coops *et al.* 2012; D’Odorico *et al.* 2015). It can be useful to identify mismatches between key phenophase appearance and animal activity (Coops *et al.* 2012). For instance, some bird populations depend on the phenology of plants at breeding sites (Szulkin *et al.* 2015). However, phenological observation products of scientific research rarely obtain long-term data from large areas of the Earth's surface or for various species (Elmore *et al.* 2016; Misra *et al.* 2016).

Citizen science is an alternative method used to obtain phenological data and contribute to scientific knowledge of ecosystem dynamics (Elmore *et al.* 2016). Phenological observation networks through citizen science have a long history in countries such as the United States of America (Schwartz *et al.* 2012), Canada (Beaubien and Hamann 2011), and countries in Europe (van Vliet *et al.* 2003). Data quality, the precision of *in situ* observations (Elmore *et al.* 2016) or a limited focus on specific sites or species (Ganguly *et al.* 2010) are disadvantages of data generated by volunteers. Such deficiencies can be resolved with continuous training and standardized observation protocols. These observations provide information with scientific rigor comparable to that generated by academic research (Elmore *et al.* 2016; Crimmins *et al.* 2017).

The use of satellite imagery has allowed the development of techniques to characterize the interannual phenological response of vegetation (Coops *et al.* 2012; Liang *et al.* 2011), often called “land surface phenology” (LSP; Liang *et al.* 2011; Rautiainen *et al.* 2012; Jin *et al.* 2017). LSP is different from ground-level phenological observations of specific organisms (Henebry and de Beurs 2013) since LSP integrates signals from land surface processes and

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

plant reflectance and considers patterns of variations related to biological phenomena at regional, continental, or global scales (Liang *et al.* 2011; Henebry and de Beurs 2013). Vegetation indices (VIs) are calculated from satellite imagery (Choi, *et al.* 2011) and allow the identification of ecosystem seasonal cycles. A VI indicates photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (Kosmala *et al.* 2016). Because there are differences in the reflectance values of the visible and near-infrared spectra that are clear through remote sensing, information on health conditions or vegetation characteristics can be inferred at the cellular level (Doktor *et al.* 2009). These indices can also be used to obtain phenological information to understand the dynamics of ecosystems at large spatial scales and at regular time intervals (Baumann *et al.* 2017; Liu *et al.* 2015; Ganguly *et al.* 2010). Despite these advantages, remote sensors are exposed to atmospheric disturbances and low temporal resolutions, which may result in data of poor quality. Therefore, it is necessary to validate the accuracy of the phenological parameters obtained by remote sensing when comparing data with that obtained on the surface (ground-based phenology) (Liang *et al.* 2011; Sigiura *et al.* 2013). Due to the need for improvements in the generation of phenological data, monitoring alternatives such as digital repeating cameras known as phenocams, whose products are not affected by Earth's atmosphere, have improved the quality of the data obtained (Hmimina *et al.* 2013). Phenocams provide information on the phenology of vegetation (Coops *et al.* 2012) and are potentially useful for comparison with satellite monitoring data (D'Odorico *et al.* 2015). Phenocam images can obtain data from 0.5 m (Rautiainen *et al.* 2012) to 21 m (Choi *et al.* 2011) on the ground surface at hourly and daily intervals (Coops *et al.* 2012; Xie *et al.* 2018).

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Cross-scale phenological monitoring is challenging due to scale differences at the level of individual trees, communities, or even ecosystem comparisons (Fisher *et al.* 2007). Combining observations made through citizen science and remote sensing enables an understanding of the phenological variation at different temporal and spatial scales (Liang *et al.* 2011; Ogunbadewa *et al.* 2014; Karskauskaite *et al.* 2017). Different methodologies have been proposed to solve this issue, such as scaling the observations of individual trees to populations, communities and landscape phenology (Liang *et al.* 2011; Liu *et al.* 2015), since it is difficult for individual plant measurements to represent the complexity of phenological patterns and processes of heterogeneous biophysical environments across multiple scales (Liang and Schwartz, 2009). However, multiple monitoring methodologies have been developed to characterize the phenological cycle of the species in forest ecosystems. An analysis of the literature comparing remote sensing and *in situ* phenological observations has not been carried out to provide evidence of their advantages and disadvantages. It is necessary to carry out these types of evaluations to improve decisions about which data can be used in future research projects regarding the phenology of the species present in forest ecosystems. The aims of this work were to a) present a content-analysis-based review of scientific publications between 2000 and 2018 about the coupling of phenological monitoring methods in the world's forest ecosystems; b) identify the potential of cross-scale monitoring as an alternative that combines ground-based and satellite observations to characterize the phenological response of forest ecosystem vegetation; c) present advances and development in the techniques and tools used to characterize the phenological response of vegetation in forest ecosystems; and d) present challenges involved in carrying out phenological observations at two different scales.

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

II.2 Materials and methods

A review of English scientific literature was carried out on the Scopus platform (www.scopus.com). The articles were selected according to the four-phase flow diagram of Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA; Figure II.1; Moher *et al.* 2009). The following syntax was used to perform the search in the Scopus database “TITLE-ABS-KEY (phenology OR phenological) AND (forest OR forestry OR woodlands OR "forest ecosystem" OR woody OR boreal OR temperate OR deciduous OR coniferous OR tree OR evergreen OR tropical OR taiga) AND ("remote sensing" OR imagery OR satellite) AND ("ground-based" OR "ground-truth" OR "in situ" OR "ground-level"). To guarantee the quality and representativeness of the information, the results were analyzed and systematized based on the SALSA framework (Search, Appraisal, Synthesis, Analysis; Grant and Booth, 2009) and then integrated into a database with the fields of the year of publication, name of the journal, sensors and vegetation indices used, surface observation tools, temporal and spatial scales and analysis levels (ecosystem, bioclimatic regions, ecoregions, landscape, functional groups of plants, etc.), among other data (Figure II.2)

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

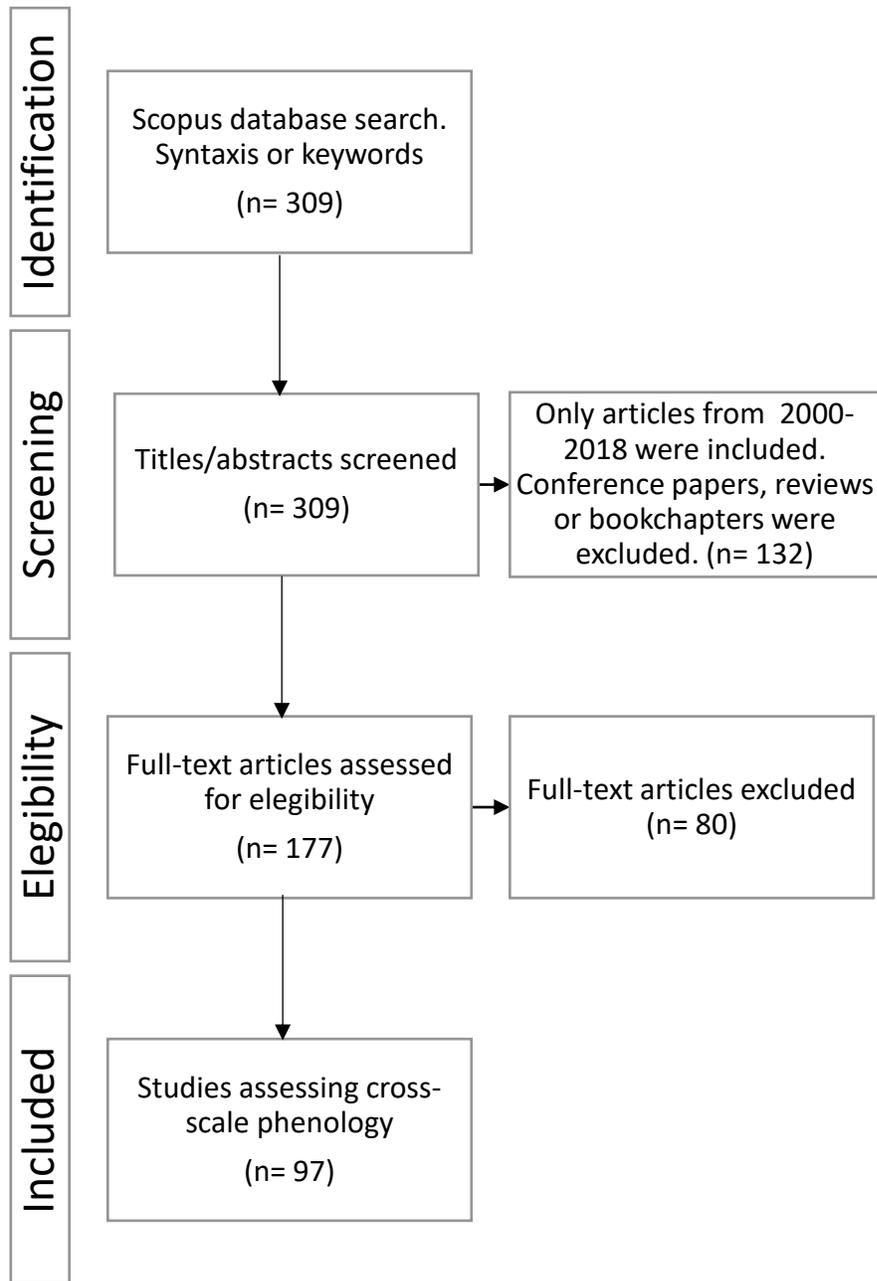


Figure II.1 Flow chart of information filters for different phases of a cross-scale phenological monitoring systematic review (Modified from Moher *et al.* 2009)

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

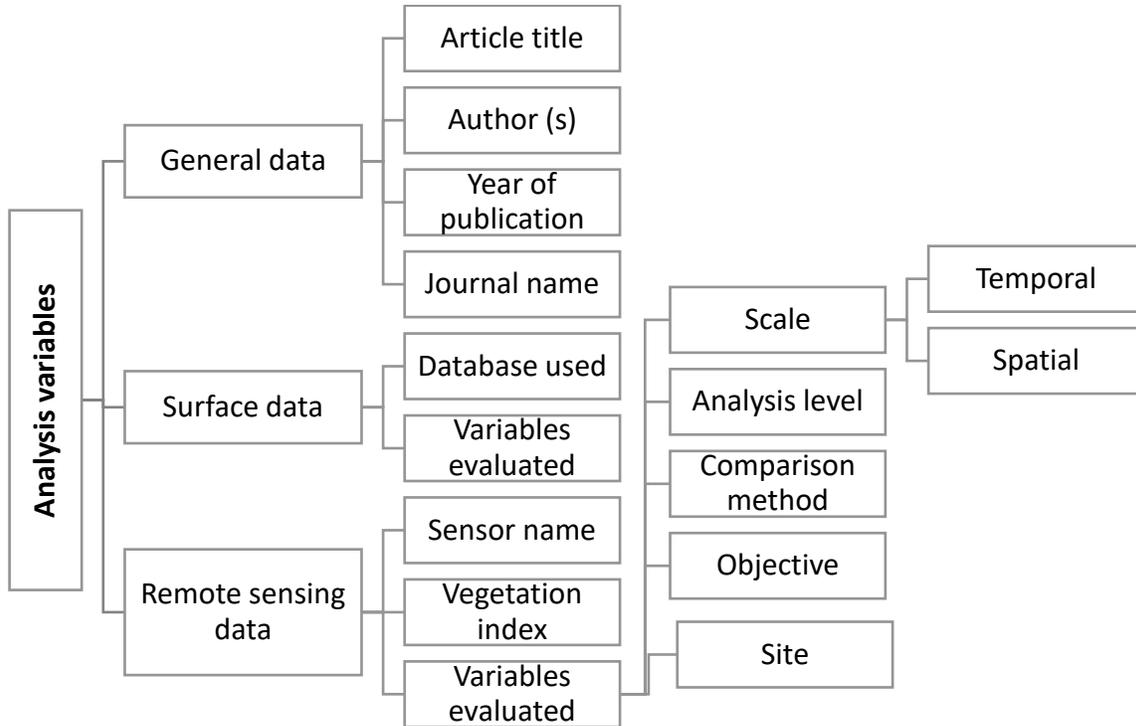


Figure II.2 Data analyzed and used to build the analysis matrix for scientific articles. Based on the SALSA framework (Modified from Grant and Booth, 2009)

II.3 Results and discussion

II.3.1 Review of cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems

In total, 97 articles were selected and reviewed. Thirty percent corresponded to research in forested regions of the United States, 8% in Canada, 6% in China, 4% in Finland, and 3% in each of Germany, Korea, and Japan. In Latin America, only 3% of articles were in Brazil and 2% were in Argentina and Mexico together (Figure II.3). Some articles were found for wider regional studies, such as Brandt *et al.* (2016), who compared the fraction of absorbed

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

photosynthetically active radiation for woody species between satellite products and *in situ* observations in the Sahel zone in North Africa. Another was by Delbart *et al.* (2005), who developed a new method to derive greening-up and leaf coloring dates in boreal regions using the normalized difference water index (NDWI) in Central Siberia. Other examples of regional phenological studies were carried out by D’Odorico *et al.* (2015) in deciduous broadleaf and mixed forest in the Northern Hemisphere (United States, Canada, and Central Europe) or by Hmimina *et al.* (2013) in deciduous and evergreen forest, tropical moist evergreen forest and savannah in Africa and northern France.

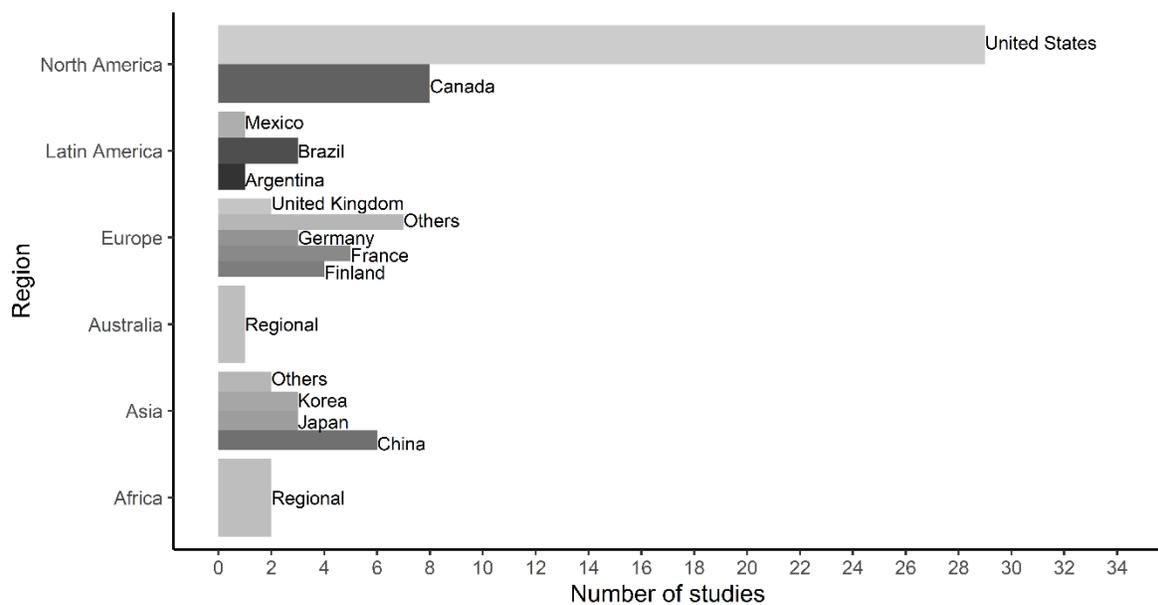


Figure II.3 Number of articles published by region and country. The “Regional” category indicates that the research was carried out in more than one country per region

The journals with the most publications were "Remote Sensing of Environment" (29%) and "Remote Sensing" (12%), followed by "Agricultural and Forest Meteorology" (7%),

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

“International Journal of Remote Sensing” (5%), “Global Change Biology” (4%), and “Biogeosciences” and “Remote Sensing Letters”, each with 3%.

Regarding publication year, 78% were published between 2011 and 2018, while the remaining 22% were published between 2003 and 2010 (Figure II.4). This significant increase in publications in the research field of phenology can be attributed to the demand for climate change indicators (Adole *et al.* 2016) or to the necessity of comparisons with *in situ* observations, remote sensing data, and VIs that have been developed to estimate the phenological cycle of plant species. MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) was the most commonly used satellite for generating phenological parameters (78% of the publications), followed by Landsat (19%) and AVHRR (Advanced Very High-Resolution Radiometer, 13%).

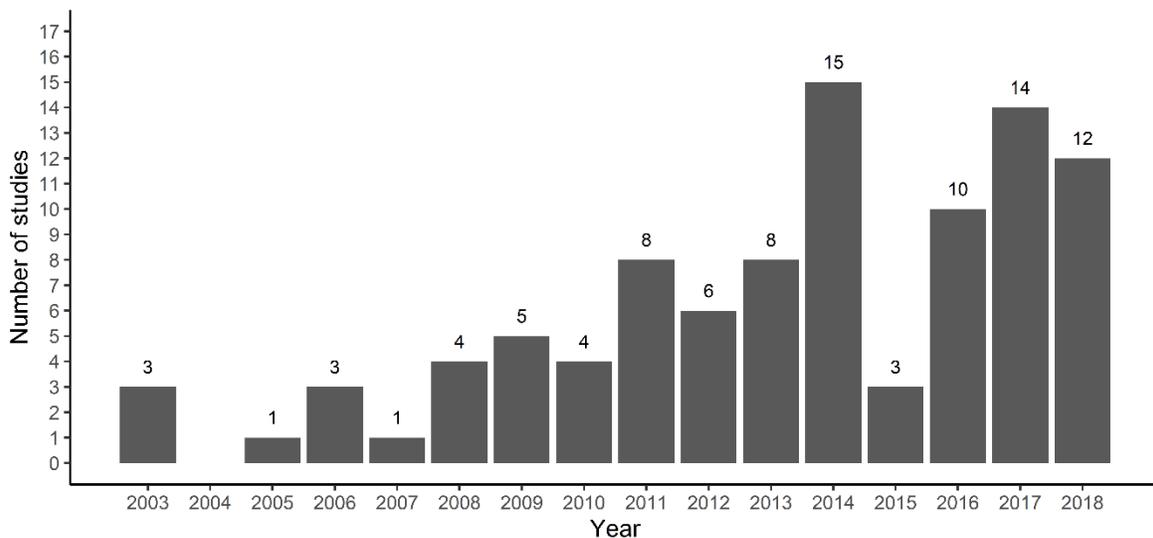


Figure II.4 Number of articles published per year

II.3.2 Problems and research objectives in cross-scale phenological monitoring

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Cross-scale phenological monitoring has been useful for comparing remote sensing with *in situ* observations and corroborating the precision of satellite imagery to characterize vegetation phenology. This information could be applied to understand the relationship between phenology and climate change impacts or the timing of some key phenological phases with animal activity in forest ecosystems. Due to the significant number of research objectives of each article reviewed, we synthesized these objectives into seven major categories. To obtain these categories, each objective was synthesized into a keyword. The resulting keywords were then regrouped into similar categories resulting in seven categories proposed in this work. Each article was included in one or more categories according to their research objectives.

A. *Cross-scale comparison.* Seventy-one percent of the articles aimed to corroborate the data generated through satellite imagery using surface data from either digital cameras or phenocams (Baumann *et al.* 2017; Filippa *et al.* 2018; Yuan *et al.* 2018), flux towers (Hmimina *et al.* 2013; Karkauskaite *et al.* 2017) or from citizen science networks (White *et al.* 2009; Guyon *et al.* 2011; Elmore *et al.* 2016). This classification was also applied to the validation of models and algorithms for predicting the date of occurrence of specific phenological phases (Melaas, *et al.* 2013; Yuan *et al.* 2018) when those models were constructed with remotely sensed phenological and meteorological data.

B. *Improvement of methodologies.* Thirteen percent of the studies proposed new monitoring methods of forest ecosystem phenology. For instance, some deficiencies of the normalized difference vegetation index (NDVI) have been found in determining autumn or snow season phenology of some perennial species (Kang *et al.* 2003; Hmimina *et al.* 2013; Czernecki *et*

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

al. 2018); additionally, research has attempted to improve and propose new vegetation indices that are able to accurately estimate the phenology of the vegetation during the snow season (Sugiura *et al.* 2013; Jin and Eklundh, 2014; Jin *et al.* 2017).

C. *Habitat conservation and synchronization of key phenological phases.* Three percent of the studies focused on the conservation of biodiversity and food availability of animal species (Coops *et al.* 2012) or on the egg-laying dates of some birds (Coops *et al.* 2012; Szulkin *et al.* 2015). Fire prevention through understory monitoring was another objective of these studies (Hassan and Rahman 2013a).

D. *Models and algorithms generation.* Fourteen percent focused on predicting the occurrence of phenological phases of different forest ecosystems through the generation of models made and validated through *in situ* observations or by images from digital repeating cameras (Melaas, *et al.* 2013; Yuan *et al.* 2018). In other cases, predictive models of phenological phases replaced the lack of surface information networks (Czernecki *et al.* 2018).

E. *Description of phenological cycles.* Nine percent characterized the phenological behavior of the species present in different forest ecosystems (Gasparri *et al.* 2010; Wang *et al.* 2018).

F. *Climate and weather effects on phenology.* Thirteen percent studied the relationship between climatic variables (mainly temperature) and the development of certain phenological phases (Soudani *et al.* 2012; Friedl *et al.* 2014; Sacardi *et al.* 2014) and identified the potential of climate variables to predict the date of occurrence of phenological phases (Yuan *et al.* 2018).

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

G. *Comparison of methodologies.* Twenty-one percent of the studies compared remote sensing methodologies to characterize the phenological cycle of the vegetation (D' Odorico *et al.* 2015; Melaas *et al.* 2016; Filippa *et al.* 2018). In this category a cross-scale analysis was not the main objective; however, the authors made use of surface phenological data in order to validate their remote sensing results. The comparison between remote sensing and ground-based phenological data was included as another objective in the category “A” of this work.

II.3.3 Getting phenological data for cross-scale comparison

Phenological monitoring has been carried out by *in situ* and remote sensing techniques, both of which provide useful and complementary information. We found that two scales of comparison, land surface and ground-based phenology, used different parameters and tools to track the phenological response of vegetation in forest ecosystems. We present our results in two sections: remote sensing and *in situ* phenological monitoring.

II.3.4 Land surface phenological monitoring: sensors and vegetation indices

Phenological data are generally collected through surface observations and focused on specific species and sites (Ganguly *et al.* 2010). Remote sensing can detect LSP (Liang *et al.* 2011) and determine the phenological pattern of vegetation related to climate variability in large geographic areas (Ganguly *et al.* 2010; Hassan and Rahman. 2013b). However, satellites are exposed to image contamination by the presence of aerosols and clouds (Nagai *et al.* 2011; Hmimina *et al.* 2013), and this contamination inhibits the availability of scenes throughout the year (Baumann *et al.* 2017). Low temporal and spatial resolutions (Baumann

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

et al. 2017), mountainous terrain, and elevation differences are other disadvantages of some sensors (Maignan *et al.* 2008) that track the phenological response of the species.

The literature reported that the MODIS satellite characterized mixed forest phenology accurately but only for the greening of spring phases because these phenophases occur after leaf fall in winter, but the accuracy was lower in the autumn-winter phases since leaf color changes (Kang *et al.* 2003; Hmimina *et al.* 2013; Lange *et al.* 2017; Czernecki *et al.* 2018). Despite these disadvantages, few studies have focused on evaluating the potential of MODIS to monitor the autumn phenology of forest ecosystems. One of these studies was carried out by Liu *et al.* (2015), who compared dormancy onset dates derived from MODIS NDVI and EVI (enhanced vegetation index) data with *in situ* observations of leaf coloration and leaf fall. The authors found that dormancy onset dates were estimated earlier through the NDVI than through the EVI. Additionally, the NDVI-based dormancy onset dates had a greater similarity with the date of full leaf coloration (MAE: 3 days), while the EVI had a greater correspondence with the date of full leaf fall (MAE: 3.5 days). However, this study was carried out only for deciduous trees; evergreen trees were not included due to their lack of clearly definable autumn phenophases. Additionally, the spatial resolution of this satellite was too low to capture the phenological differences at finer scales for ecological applications (Baumann *et al.* 2017; Lange *et al.* 2017). However, Soudani *et al.* (2008) indicated that MODIS “constitutes a significant technical improvement in terms of spatial and spectral resolution, geolocation precision, atmospheric corrections scheme and sensor calibration in comparison with AVHRR”.

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

The use of more than one satellite to estimate phenological variables solves the lack of low spatiotemporal resolution and helps to detect vegetation dynamics more precisely (Coops *et al.* 2012; Liang *et al.* 2014). For example, the low spatial resolution of MODIS (250 m and 500 m) was compensated by using Landsat images (30 m, Coops *et al.* 2012; Liang *et al.* 2014) or Sentinel images (10 m and 20 m, Lange *et al.* 2017). The results obtained with both remote sensors were similar when comparing the start ($R^2 = 0.65$), end ($R^2 = 0.72$), and length ($R^2 = 0.70$) of the growing season with observations using phenocams (Coops *et al.* 2012) or when comparing the spring green-up onset of MODIS and land surface phenology budburst dates with low errors (MAE: 4.48 days; Liang *et al.* 2014). However, some variations were attributed to microclimate conditions that influence scales such as Landsat and were not detectable with MODIS (Baumann *et al.* 2017). Despite the shortcomings, satellite images provide a reliable and close approximation of what is observed through surface monitoring (Czernecki *et al.* 2018).

Satellite imagery allows the calculation of spectral indices, especially VIs. There are currently several indices that have been used for different purposes, including the estimation of phenological parameters related to the vegetation growing season. Among all the indices, the NDVI is the most cited in the literature that was reviewed (Table 1) and is an indicator of the greening of vegetation based on the red and infrared bands of satellites (Coops *et al.* 2012; Hassan and Rahman. 2013b). The second most cited index was the EVI, which measures the greenery and vegetation structure using correction factors for soil and atmospheric factors (Huete *et al.* 2002). Despite the NDVI being the most commonly used index, some articles reported deficiencies in estimating some phenological parameters compared to surface data, mainly in places where snow was present (Sugiura *et al.* 2013; Jin

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

and Eklundh 2014; Jin *et al.* 2017). The NDVI showed better results in identifying transition dates related to the spring phases or the beginning of greening, while the autumn phases, such as leaf color change, were not correctly identified (Hmimina *et al.* 2013; Lange *et al.* 2017). This result could be because the NDVI rate of change during the spring and autumn phases is higher than that in the rest of the growing season; however, the NDVI values decrease slower during the autumn phases than in the spring phases of leaf development (Hmimina *et al.* 2013).

The presence of snow also hinders the precision of the NDVI used to characterize some stages of the growing season, since the melting snow evidences false greening that can be confused with the actual development of the vegetation canopy (Delbart *et al.* 2005; Delbart *et al.* 2006; Jin *et al.* 2017). In this case, the proposals of other vegetation indices, such as the plant phenology index (PPI; Jin and Eklundh 2014; Jin *et al.* 2017), showed a better ability to predict the stages of the growing season of boreal forest species and highlighted how the NDVI is modified at latitudes where snowfall occurs frequently (Sugiura *et al.* 2013; Jin and Eklundh 2014; Jin *et al.* 2017; Lange *et al.* 2017). The literature mentions that the PPI (Table 1) can be a substitute for the NDVI at sites located in boreal and subboreal latitudes, where the presence of snow is common. The PPI allows better monitoring of autumn phenology; additionally, given the rapid rates of NDVI change, it does not capture the timing of leaf coloration (Jin *et al.* 2017).

Hassan and Rahman (2013a) indicated that the NDWI estimates the amount of moisture or water in the canopy. They calculated threshold values of accumulated growing degree days (AGDD) based on a favorable temperature regime for plant growth and NDWI for predicting

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

understory grass greening during 2006 in Alberta, Canada. They found that AGDD was better for determining key phenological dates related to the greening of the understory in the boreal forest when compared to the NDWI. The phenology index (PI), perpendicular vegetation index (PVI), and difference vegetation index (DVI) were other vegetation indices used in the published literature (Table 1).

Table II.1 Vegetation indices used to measure the phenology of vegetation in forest ecosystems. Each article was included in one or more categories according to the number of indices used

Vegetation index and % of papers	Equation	References
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI; 63%)	$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$ (1)	Steinberg <i>et al.</i> 2006; Maignan <i>et al.</i> 2008; White <i>et al.</i> 2009; Doktor <i>et al.</i> 2009; Gasparri <i>et al.</i> 2010; Choi <i>et al.</i> 2011; Liang <i>et al.</i> 2011; Coops <i>et al.</i> 2012; Rautiainen <i>et al.</i> 2012; Soundani <i>et al.</i> 2012; Sugiura <i>et al.</i> 2013; Hmimina <i>et al.</i> 2013; Xu <i>et al.</i> 2014; Klosterman <i>et al.</i> 2014; Kovalskyy <i>et al.</i> 2014; Szulkin <i>et al.</i> 2015; D’Odorico <i>et al.</i> 2015; Liu <i>et al.</i> 2015; Elmore <i>et al.</i> 2016; Misra <i>et al.</i> 2016; Verma <i>et al.</i> 2016; Juutinen <i>et al.</i> 2017; Jin <i>et al.</i> 2017; Lange <i>et al.</i> 2017; Peng <i>et al.</i> 2017; Ulsing <i>et al.</i> 2017; Wang <i>et al.</i> 2017a.
Enhanced Vegetation Index (EVI 28%)	$EVI = Gx \frac{(NIR-RED)}{NIR+C1xRED+C2xBLUE+L}$ (2)	Ganguly <i>et al.</i> 2010; Choi <i>et al.</i> 2011; Liang <i>et al.</i> 2011; Rautiainen <i>et al.</i> 2012; Shen <i>et al.</i> 2014; Xu <i>et al.</i> 2014; Klosterman <i>et al.</i> 2014; D’Odorico <i>et al.</i> 2015; Liu <i>et al.</i> 2015; Melaas <i>et al.</i> 2016; Moore <i>et al.</i> 2016; Baumann <i>et al.</i> 2017; Peng <i>et al.</i> 2017; Wang <i>et al.</i> 2017b
Plant Phenology Index (PPI; 3%)	$PPI = -KxiN \frac{(NIR-RED)_{max}-(NIR-RED)}{(NIR-RED)_{max}-(NIR-RED)_{soil}}$ (3)	Jin <i>et al.</i> 2017; Karkauskaite <i>et al.</i> 2017

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Phenology Index (PI; 2%)	$PI = (NDVI + NDII) * (NDVI - NDII)$ (4)	D'Odorico <i>et al.</i> 2015; Wang <i>et al.</i> 2017b
Perpendicular Vegetation Index (PVI; 1%)	$PVI = \frac{NIR - aRED - b}{\sqrt{1 + a^2}}$ (5)	Guyon <i>et al.</i> 2011
Difference Vegetation Index (DVI; 1%)	$DVI = NIR - a * RED$ (6)	Maignan <i>et al.</i> 2008
Normalized Difference Water Index (NDWI; 8%)	$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ (7)	Sugiura <i>et al.</i> 2013; Delbart <i>et al.</i> 2005; Delbart <i>et al.</i> 2006; Delbart <i>et al.</i> 2008.
Normalized Difference Infrared Index (NDII; 3%)	$NDII = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ (8)	Issacson <i>et al.</i> 2012; Kobayashi <i>et al.</i> 2016; Wang <i>et al.</i> 2017c
Normalized Difference Phenology Index (NDPI; 1%)	$NDPI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}^{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}^{SWIR}}$ (9)	Wang <i>et al.</i> 2017b
Green-Red Vegetation Index (GRVI; 1%)	$GRVI = \frac{Ref_{green} - Ref_{red}}{Ref_{green} + Ref_{red}}$ (10)	Nagai <i>et al.</i> 2014
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI; 2%)	$SAVI = \frac{(1+L)(NIR-RED)}{(NIR+RED+L)}$ (11)	Gasparri <i>et al.</i> 2010; Sacardi <i>et al.</i> 2014
Enhanced Vegetation Index 2 (EVI2; 2%)	$EVI2 = G \frac{(NIR-RED)}{NIR+RED+L}$ (12)	Cuba <i>et al.</i> 2018; Zhang <i>et al.</i> 2018
Temporally Normalized Brownness Index (1%)	$NF_b(t) = 1 - \frac{1}{1 + e^{a+bt}}$ (13)	Zhang <i>et al.</i> 2011

Notes: NIR: Near-infrared; SWIR: Shortwave-infrared; Red, Green, and Blue: Reflectance values in that wavelength

II.3.5 Ground-based phenology: from citizen science to phenocams

Surface observations made over long time series are one of the main tools used to assess phenology for different purposes (Hassan and Rahman 2013a) and the effectiveness of remote sensors in predicting the phenological cycle of vegetation (Hmimina *et al.* 2013; Filippa *et al.* 2018). This type of monitoring is carried out through different direct observation tools, such as citizen science, phenocams, flux towers, and hyperspectral sensors (Figure II.5).

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

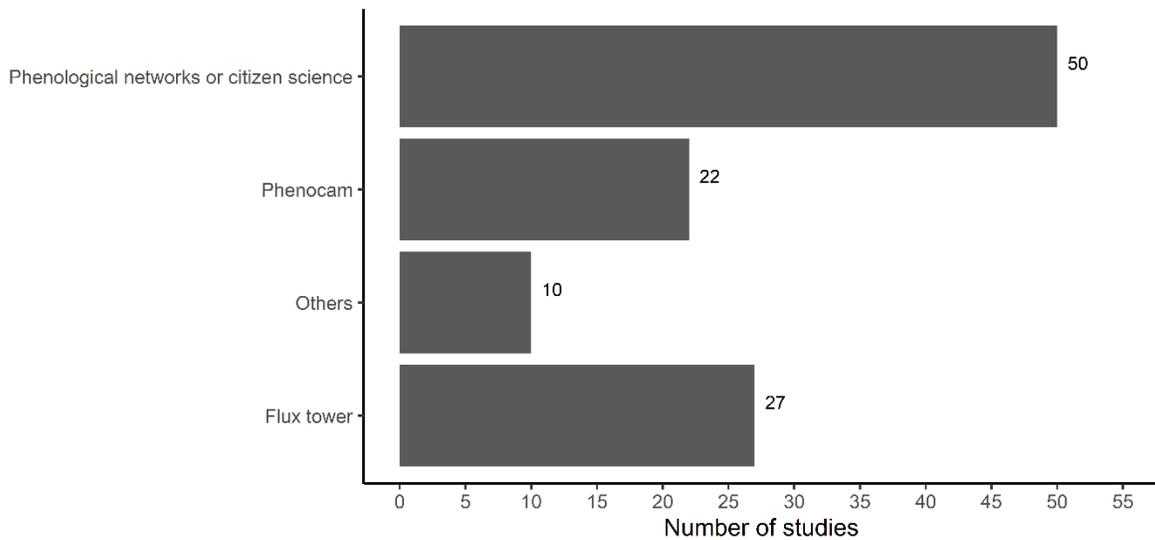


Figure II.5 Number of articles based on the device used to characterize the phenology of vegetation through observations in situ. The “Others” category includes ceptometers, hyperspectral sensors, and other kinds of sensors

Phenological monitoring can provide valuable information and allow the data to be compared with professional data, following observation protocols and training. Elmore *et al.* (2016) showed a high correlation between the phenology of individual trees (surface observations) and the surrounding phenology characterized by satellite images. Data generated by citizen science are even compatible with VIs, such as PPI, which provides better approximations than the NDVI when comparing the start and end of the growing season with the emergence and 100% color change of leaves, respectively (Figure II.6; Elmore *et al.* 2016; Jin *et al.* 2017).

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

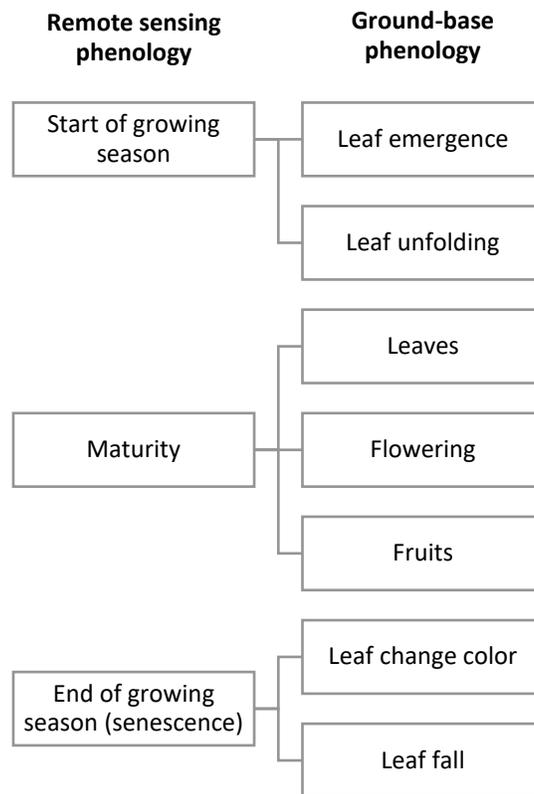


Figure II.6 Most common phenological phase monitoring in forest ecosystems and comparisons between remote sensing and ground-based monitoring

The data generated by citizen scientists are applied to analyze the phenological response of vegetation to climate change or climate variability by identifying delays or advances in the date of occurrence of some key phenophases (White *et al.* 2009; Elmore *et al.* 2016). Among the disadvantages of information generated through citizen science are difficulties in comparing the collected data with other data sources with different scales (Elmore *et al.* 2016). In some cases, volunteers can identify only some of the phenological events; however, they are able to monitor at the individual tree level (Kosmala *et al.* 2016), unlike remote sensing, which averages the phenology of plant communities.

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Citizen science data are usually scarce, and volunteers' observations are for a short period or specific places. For that reason, other tools have been proposed for monitoring vegetation phenology. Phenocams are digital cameras that take periodic images of different soil covers and capture the life cycles of plants. The use of repetition cameras for vegetation monitoring has been increasing (Kosmala *et al.* 2016). This review found that since 2011, publications using this tool have often been published. The advantages of phenocams are their low cost (199 USD - 599 USD), resistance to atmospheric conditions, and high temporal resolution (Sugiura *et al.* 2013). However, phenocams have some drawbacks, as their coverage or field of vision is restricted given their lack of movement, the absence of wavelengths of importance for some objectives, and the need to install cameras at various points to monitor ecosystems in large regions (Choi *et al.* 2011; Sugiura *et al.* 2013). Digital cameras provide useful information to compare and calibrate data obtained by satellite images and supply information on the dates of snowfall and melt that complement the observations of vegetation (Sugiura *et al.* 2013). There are no specialized public cameras that can contribute to ground-based phenological monitoring at a regional scale and detect changes in the environment (Graham *et al.* 2010).

We found that flux towers have been used for monitoring vegetation phenology. Flux towers have the advantages of generating continuous information close to the tree canopy and the data have fine spatial and temporal scales, with less impact by atmospheric conditions. The main objective of these towers is to determine the energy balance of an ecosystem. These towers are also used to mount hyper and multispectral sensors with a vision of up to 72 m² of canopy area, and data can be sent via Ethernet to a server. If enabled with other sensors, they can also provide weather information (Sacardi *et al.* 2014; Wang *et al.* 2017b; Yuan *et*

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

al. 2018) and gross primary production measurement (GPP; Shen *et al.* 2014; D’Odorico *et al.* 2015; Karkauskaite *et al.* 2017).

II.3.6 Challenges in cross-scale phenological comparison

Comprehensive phenological data at global and long-term scales are necessary to understand the phenological variation in ecosystems as a whole (Nagai *et al.* 2011) and their response to climate change impact since research began suggests that an increase in mean temperature advances green-up onsets in middle-high latitudes (Zhang *et al.* 2007). However, continuous observations are difficult to generate from ground-based monitoring; therefore, these observations have been derived from satellite imagery through vegetation indices (Delbart *et al.* 2005). It is important to evaluate the precision of this VI by comparing it to *in situ* data. We summarize the phenological parameters, tools, scales, and techniques in Figure II.7. The main challenge for cross-scale phenological monitoring is in comparing several scales and types of vegetation, ecosystems, functional types of plants, or individual trees.

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

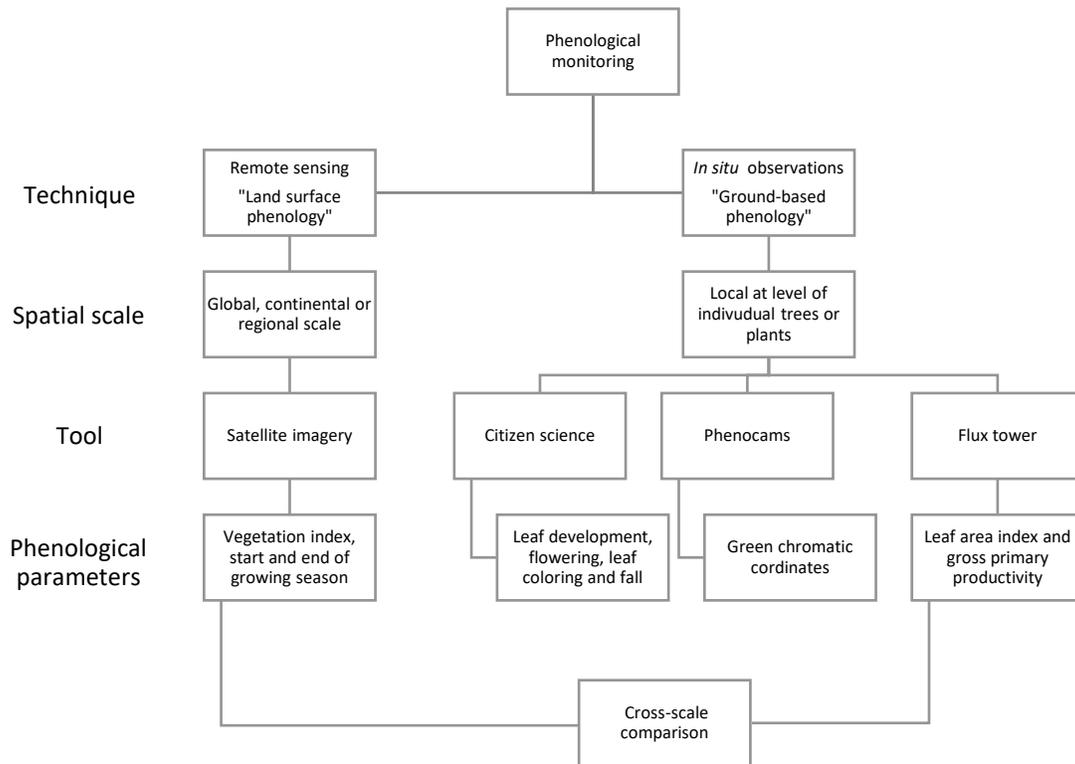


Figure II.7 Flowchart for cross-scale phenological monitoring in forest ecosystems

The lack of standardized protocols for surface phenological observation causes world network observations to use different phenological phases of forest ecosystems. Although some phenological phases have the same name, others might be named differently by country or phenological network, making it difficult to analyze data from a different database. This leads to seeking equivalences between those that refer to the same phenological phase. For example, Klosterman *et al.* (2014), through the use of phenocams, observed the beginning of leaf fall, the full maturity of the canopy, the beginning of the leaf color change in autumn, and the loss of all leaves, while, the flowering, leaf fall, change of leaf color and fruits were observed in Poland by the re-established observational network run by the Institute of

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

Meteorology and Water Management-National Research Institute (Czernecki *et al.* 2018). Additionally, Elmore *et al.* (2016) used phenological phases provided by the USA National Phenology Network, such as leaf bud opening, open flowers, full bloom, end of flowering, pollen, fruits, leaves, color change in leaves, and leaf fall.

Of the analyzed articles, 35% corresponded to spring phenology and 42% to deciduous forest ecosystems, given the viability to identify transition dates, while evergreen conifer forests (5%) have limited changes throughout their life cycle, making it difficult to identify the transition dates of this type of vegetation, especially in the autumn, which is associated with the end of the growing season (Yuan *et al.* 2018). However, Zhang *et al.* (2011) developed a VI called the temporally normalized brownness index that detects changes in fall phenology and an algorithm to monitor and forecast fall foliage and coloration phases across various ecosystems (Zhang *et al.* 2012).

Conclusions

Phenological monitoring through satellite imagery has become more common due to the increased access to this kind of technology in recent years. The NDVI is currently the most commonly used method to estimate the phenological cycle of vegetation given its relative ease of calculation. The NDVI can be complemented with other VIs; for example, among the PI, EVI, or PPI., the latter provides information about the phenological cycle of the vegetation under snowfall conditions and, therefore, is useful in northern latitude countries.

It is necessary to compare remote sensing data with *in situ* observations due to the exposure of satellite imagery to clouds and low spatiotemporal resolutions that can interfere with the

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

quality of the information generated. A cross-scale approach allows comparison between vegetation phenology and weather or climate and can even identify the climate change impacts in world forest ecosystems. In this review, we demonstrated that this kind of analysis has increased in recent years. Papers were concentrated in a few countries, such as the United States, Canada, and China, denoting information gaps in some countries or regions, such as Latin America or Africa.

Cross-scale phenological monitoring presented some issues related to comparing several observation scales and types of vegetation, ecosystems, functional types of plants, or individual trees or focusing only on deciduous species due to the ability to detect seasonal changes. The shortage of *in situ* data compared with remote sensing data is another problem related to cross-scale comparison because most of the phenological studies analyzed in this review were carried out for entire countries, ecosystems or regions and compared with citizen science data for local sites. Only a few studies carried out a scaling from individual phenology to landscape phenology to better compare data with remote sensing phenology data. For that reason, it is imperative to have *in situ* observations for monitoring the largest areas of forest in the world and to be able to validate remote sensing observations.

Citizen scientists' networks provide useful information; therefore, it is necessary to continue promoting their development in places where they are absent. The continuous training of volunteers and creating standardized observation protocols allows us to obtain scientific-quality data, carry out comparisons with remote sensing data and create complementary databases between phenological networks. Phenological networks with digital repeating

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

cameras and flux towers have contributed to minimizing the problems related to the absence of observers and standardized protocols of observation in some regions.

In this review, we identified that citizen science networks were the most commonly used technique for monitoring ground-based phenology; however, the use of phenocams is increasing and could be a complementary instrument in obtaining phenological data while more citizen science networks are developed. Cross-scale comparison between remote sensing data and ground-based observations based on qualified data is an imperative issue to better understand the phenological response of different species in forest ecosystems, mainly to climate variables.

References

- Adole T, Dash J, Atkinson P (2016). A systematic review of vegetation phenology in Africa. *Ecol Inform* 34: 117-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.05.004>
- Baumann M, Ozdogan M, Richardson A, Radeloff V (2017). Phenology from Landsat when data is scarce: Using MODIS and dynamic time-warping to combine multi-year Landsat imagery to derive annual phenology curves. *Int J Appl Earth Obs and Geoinform* 54(2017): 72-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.005>
- Beaubien E, Hamman A (2011). Plant phenology networks of citizen scientists: recommendations from two decades of experience in Canada. *Int J Biometeorol* 55: 833-841. <http://doi.org/10.1007/s00484-011-0457-y>
- Brandt M, Hiernaux P, Tagesson T, Verger A, Rasmussen K, Diouf A, Mbow C, Mougin E, Fensholt R (2016). Woody plant cover estimation in drylands from Earth Observation based seasonal metrics. *Remote Sens Environ.* 172(2016): 28-38. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.036>
- Choi J, Kang S, Choi G, Nishida K, Motohka T, Lim J (2011). Monitoring canopy phenology in a deciduous broadleaf forest using the Phenological Eyes Network (PEN). *J of Ecol F Biol* 34(2): 149-156. <https://doi.org/10.5141/JEFB.2011.017>
- Coops N, Hilker T, Bater Ch, Wulder M, Nielsens C, Mid G, Stenhouse G (2012). Linking ground-based to satellite-derived phenological metrics in support of habitat

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- assessment. *Remote Sens Lett* 3(3): 191-200.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2010.550330>
- Crimmins T, Crimmins M, Gerst K, Rosemartin A, Weltzin J, (2017) USA National Phenology Network's volunteer-contributed observations yield predictive models of phenological transitions. *PloS one*, 12(8): 1-17.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182919>
- Cuba N, Rogan J, Lawrence D, Williams C (2018) Cross-scale correlation between in situ measurements of canopy gap fraction and landsat-derived vegetation indices with implications for monitoring the seasonal phenology in tropical forests using MODIS data. *Remote Sens* 10(7): 1:21. <https://doi.org/10.3390/rs10070979>
- Czernecki B, Nowosad J, Jablonska K (2018). Machine learning modeling of plant phenology based on coupling satellite and gridded meteorological dataset. *Int J Biometeorol* 62(2018): 1297-1309.
- D'Odorico P, Gonsamo A, Gough Ch, Bohrer G, Morison J, Wilkinson M, Hanson P, Gianelle D, Fuentes J, Buchmann N (2015). The match and mismatch between photosynthesis and land surface phenology of deciduous forest. *Agri For Meteorol* 214-215: 25-38.
- Delbart N, Kergoat L, Le Toan T, Lhermitte J, Picard G (2005) Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sens Environ* 97(2015): 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.011>
- Delbart N, Le Toan T, Kergoat L, Fedotova V (2006) Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004) *Remote Sens Environ* 101(2006): 52-62.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.012>
- Delbart N, Picard G, Le Toan T, Kergoat L, Quegan S, Woodward I, Dye D, Fedotova V (2008) Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Glob Chang Biol* 14(2008): 603-614. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01505.x>
- Doktor D, Bondeau A, Koslowski D, Badeck FW (2009) Influence of heterogeneous landscapes on computed green-up dates based on daily AVHRR NDVI observations. *Remote Sens Environ* 113(2009): 2618-2632.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.020>
- Elmore A, Stylinski C, Pradhan K (2016). Synergistic use of citizen science and remote sensing for continental-scale measurements of forest tree phenology. *Remote Sens* 8(502): 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs8060502>
- Filippa G, Cremonese E, Migliavacca M, Galvagno M, Sonnentag O, Humphreys E, Hufkens K, Ryu Y, Verfaillie J, di Cella U, Richardson A (2018). NDVI derived from near-infrared-enabled digital cameras: applicability across different plant functional types.

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Agric For Meteorol* 249(2018): 275-285.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.003>.
- Fisher J, Mustard J (2007). Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sens of Environ* 109(2007): 261-273.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.004>
- Friedl M, Gray J, Melaas E, Richardson A, Hufkens K, Keenan T, Bailey A, O'Keefe J (2014) A tale of two springs: using recent climate anomalies to characterize the sensitivity of temperate forest phenology to climate change. *Environ Res Lett* 9(2014): 1-9.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/054006>
- Ganguly S, Friedl M, Zhang X, Verma M (2010). Land surface phenology from Modis: Characterization of the collection 5 global land dynamics product. *Remote Sens Environ* 114: 1805-1816. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.005>
- Gasparri N, Parmuchi M, Bono J, Karzenbaum H, Montenegro C (2010). Assessing multi-temporal landsat 7ETN+ images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forest of Argentina. *J Arid Environ* 74: 1262-1270.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.007>
- Graham E, Riordan E, Yuen E, Estrin D, Rundel P (2010) Public Internet-connected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system. *Glob Chang Biol* 16(2010): 3014-3023 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02164.x>
- Grant M, Booth A (2009) A typology of reviews: an analysis of 14 reviews types and associated methodologies. *Health Inf Libr J* 26(2): 91-108.
<https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Guyon D, Guillot M, Vitasse Y, Cardot H, Hagolle O, Delzon S, Wigneron JP (2011). Monitoring elevation variations in leaf phenology of deciduous broadleaf forests from SPOT/VEGETATION time-series. *Remote Sens Environ* 115: 615-627.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.006>
- Hassan Q, Rahman M (2013a). Remote sensing-based determination of understory grass greening stage over boreal forest. *J Appl Remote Sens* 7(2013): 1-11.
<https://doi.org/10.1117/1.JRS.7.073578>
- Hassan Q, Rahman M (2013b). Applicability of remote sensing-based surface temperature regimes in determining deciduous phenology over boreal forest. *J Plant Ecol* 6(1): 84-91. <https://doi.org/10.1093/jpe/rts010>
- Henebry G, de Beurs, K (2013) Remote sensing of land surface phenology: A prospectus. In Schwartz M, (ed) *Phenology: An integrative environmental science*, pp. 385-411
- Hmimina G, Dufrene E, Pontailier Y, Delpierre N, Aubinet M, Caquet B, de Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Granier A, Gross P, Heinesch B, Longdoz B, Moureaux C,

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Ourcival JM, Rambal S, Saint L, Soudani K (2013). Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sens Environ* 132: 145-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.010>
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ* 83(1-2): 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Isaacson B, Serbin S, Townsend P (2012) Detection of relative differences in phenology of forest species using Landsat and MODIS. *Landsc Ecol* 27(2012): 529-543. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9703-x>
- Jin H, Eklundh L (2014) A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sens Environ* 152(2014): 512-525. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010>
- Jin H, Jönsson A, Bolmgren K, Langvall, O, Eklundh L (2017). Disentangling remotely-sensed plant phenology and snow seasonality at northern Europe using MODIS and the plant phenology index. *Remote Sens Environ* 198(2017): 203-212. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.015>
- Juuntinen S, Virtanen T, Kondratyev V, Laurila T, Linkosalmi M, Mikola J, Nyman J, Räsänen A, Tuovinen JP, Aurela M (2017) Spatial variation and seasonal dynamics of leaf-area index in the arctic tundra-implications for linking ground observations and satellite images. *Environ Res Lett* 12(2017): 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7f85>
- Kang S, Running S, Lim JH, Zhao M, Park ChR, Loehman R (2003). A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forest, Korea: an application of MODIS leaf area index. *Remote Sens Environ* 86: 232-242, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00103-2)
- Karkauskaite P, Tagesson T, Fensholt R (2017). Evaluation of the plant phenology index, NDVI y EVI for start-of-season trend analysis of the northern hemisphere boreal zone. *Remote Sens* 9(485): 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs9050485>
- Klosterman S, Hufkens K, Gray J, Melaas E, Sonnentag O, Lavine I, Mitchell L, Norman R, Friedl M, Rhichardson A (2014). Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using phenocam imagery. *Biogeosci* 11: 4305-4320. <https://doi.org/10.5194/bg-11-4305-2014>
- Kobayashi H, Yunus A, Nagai S, Sugiura K, Kim Y, Van Dam B, Nagano H, Zona D, Harazono Y, Bret-Harte M, Ichii K, Ikawa H, Iwata H, Oechel W, Ueyama M, Suzuki R (2016) Latitudinal gradient of spruce forest understory and tundra phenology in Alaska as observed from satellite and ground-based data. *Remote Sens Environ* 177(2016): 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.020>

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Kosmala M, Crall A, Cheng R, Hufkens K, Henderson S, Richardson A (2016). Season spotter: using citizen science to validate and scale plant phenology from near-surface remote sensing. *Remote Sens* 8(726): 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs8090726>
- Kovalskky V, Roy D, Zhang X, Ju J (2014) The suitability of multi-temporal web enabled Landsat data NDVI for phenological monitoring – a comparison with flux tower and MODIS NDVI. *Remote Sens Lett* 3(4): 325-334. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.593581>
- Lange M, Dechant B, Rebman C, Vohland M, Cuntz M, Doktor D (2017). Validating MODIS and Sentinel-2 NDVI products at a temperate deciduous forest site using two independent ground-based sensors. *Sens* 17(1855): 1-18. <https://doi.org/10.3390/s17081855>
- Liang L, Schwartz M (2009) Landscape phenology: An integrative approach to seasonal vegetation dynamics. *Landsc Ecol* 24(2009): 465-472. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9328-x>
- Liang L, Schwartz M, Fei S (2011). Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sens Environ* 115: 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.013>
- Liang L, Schwartz M, Wang Z, Gao F, Schaaf C, Tan B, Morriset J, Zhang X (2014) A cross comparison of spatiotemporally enhanced springtime phenological measurements from satellites and ground in a northern U.S. mixed forest. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 52(12): 7513-7526. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2313558>
- Lieth H (1974) Purposes of a phenology book. In Lieth H, (ed) *Phenology and Seasonality Modeling*. New York, pp 3-19.
- Liu L, Liang L, Schwartz M, Donnelly A, Wang Z, Schaaf C, Liu L (2015). Evaluating the potential of MODIS satellite data to track temporal dynamic of autumn phenology in a temperate mixed forest. *Remote Sens Environ* 160: 156-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.011>
- Maignan F, Bréon FM, Bacour C, Demarty J, Poirson A (2008). Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements. Comparison with in situ data and applications. *Remote Sens Environ* 112: 496-505. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.011>
- Matthews W, Payne R, Rohweder M, Murray S (2000) *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Forest Ecosystems*. World Resources Institute. Pp. 74
- Melaas A, Friedl M, Richardson A (2016). Multiscale modeling of spring phenology across deciduous forest in the Eastern United States. *Glob Chang Biol* 22, 792-805. <https://doi.org/10.1111/gcb.13122>

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Melaas E, Friedl M, Zhu Z (2013) Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data. *Remote Sens Environ* 132(2013): 176-185. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.011>
- Misra G, Buras A, Menzel A (2016). Effects of different methods on the comparison between land surface and ground phenology- A south western Germany. *Remote Sens* 8(753), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs8090753>
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman D (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Ploss Med* 6(7): 1-6. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Moore C, Brown T, Keenan T, Duursma R, van Dijk A, Berinker J, Culvenor D, Evans B, Huete A, Hutley L, Maier S, Coupe N, Sonnentag O, Specht A, Taylor J, van Gorsel E, Liddell M (2016) Reviews and syntheses: Australian vegetation phenology: new insights from satellite remote sensing and digital repeat photography. *Biogeosci* 13: 5085-5102. <https://doi.org/10.5194/bg-13-5085-2016>
- Nagai S, Inoue T, Ohtsuka T, Kobayashi H, Kurumado K, Muraoka H, Nasahara K (2014) Relationship between spatio-temporal characteristics of leaf-fall phenology and seasonal variations in near surface- and satellite-observed vegetation indices in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Int J Remote Sens* 35(10): 3520-3536. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.907937>
- Nagai S, Saitoh T, Suzuki R, Nasahara K, Lee W, Son Y, Muraoka H (2011) The necessity and availability of noise-free daily satellite-observed NDVI during rapid phenological changes in terrestrial ecosystems in East Asia. *For Sci Technol* 7(4): 174-183. <https://doi.org/10.1080/21580103.2011.643388>
- Ogunbadewa E, Armitage R, Danson R (2014). Optical medium spatial resolution satellite constellation data for monitoring woodland in the UK. *For* 5, 1798-1814. <https://doi.org/10.3390/f5071798>
- Peng D, Wu Ch, Li C, Zhang X, Liu X, Ye H, Luo S, Liu X, Hu Y, Fang B (2017). Spring green-up phenology products derived from MODIS NDVI and EVI: intercomparison and validation using National Phenology network and AmeriFlux observations. *Ecol Indic* 7, 323-336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.024>
- Rautiainen M, Heiskanen J, Korhonen L (2012). Seasonal changes in canopy leaf area index and MODIS vegetation products for a boreal forest site in central Finland. *Boreal Environ Res* 17, 72-84.
- Sacardi M, Gomes N, de Morais V, Caldas M, Vourlitis G, de Souza J (2014). Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. *Int J Biometeorol* 58: 1181-1193. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0713-4>

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Schwartz M, Betancourt J, Weltzin J (2012). From Carprio's lilacs to de USA National Phenology Network. *Front Ecol Environ* 10(6): 324-327. <https://doi.org/10.1890/110281>
- Shen M, Tang Y, Desai A, Gough Ch, Chen J (2014). Can EVI-derived land-surface phenology be used as a surrogate for phenology of canopy photosynthesis? *Int J Remote Sens* 35(3): 1162-1174. <https://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.875636>
- Soudani K, Hmimina G, Delpierre N, Pontauiller J, Aubinet M, Bonal D, Caquet B, de Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Guyon D, Granier A, Gross P, Heinesh B, Longdoz B, Loustau D, Moureaux C, Ourcival JM, Rambal S, Saint André L, Dufrêne E (2012). Ground-based network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote Sens Environ* 123: 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.012>
- Soudani K, le Maire G, Dufrêne E, François C, Delpierre N, Ulrich E, Cecchini S (2008) Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sens Environ* 112(2008): 2643-2655. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.004>
- Steinberg D, Goetz S, Hyer E (2006) Validation of MODIS FPAR products in boreal forests of Alaska. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 4(7): 1818-1828. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862266>
- Sugiura K, Nagai S, Nakai T, Suzuki R (2013). Application of time-lapse digital imagery for ground-truth verification of satellite indices in the boreal forest of Alaska. *Polar Sci* 7: 149-161.
- Szulkin M, Zelazowski P, Marrot P, Charmantier A (2015). Application of high-resolution satellite imagery to characterize individual-based environmental heterogeneity blue tit population. *Remote Sens* 7: 13319-13336. <https://doi.org/10.3390/rs71013319>
- Ulsing L, Nichol C, Huemmrich K, Landis D, Middleton E, Lyapustin A, Mammarella I, Levula J, Porcar-Castell A (2017) Detecting inter-annual variations in the phenology of evergreen conifers using long-term MODIS vegetation index time series. *Remote Sens* 9(41): 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs9010049>
- United Nations (2019) Forest Ecosystem. Multilateral Environmental Agreement. <https://www.informea.org/es/terms/forest-ecosystem>. Accessed 18 August 2020
- van Vliet A, de Groot R, Bellens Y, Braun P, Bruegger R, Bruns E, Clevers J, Estreguil Ch, Flechsig M, Jeanneret F, Maggi M, Martens P, Menne B, Menzel A, Sparks T (2003). The European Phenology Network. *Int J Biometeorol* 47: 202-212. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0174-2>

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Verma M, Friedl M, Finzi A, Phillips N (2016) Multi-criteria evaluation of the suitability of growth functions for modeling remotely sensed phenology. *Ecol Model* 323(2016): 123-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.12.005>
- Wang C, Chen J, Wu J, Tang Y, Shi P, Black T, Zhu K (2017c) A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystem. *Remote Sens Environ* 196(2017): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.031>
- Wang C, Li J, Liu Q, Zhong B, Wu Sh, Xia CH (2017b). Analysis of differences in phenology extracted from the Enhanced Vegetation Index and leaf area index. *Sens* 17(1982): 1-16. <https://doi.org/10.3390/s17091982>
- Wang J, Wu Ch, Zhang Ch, Ju W, Wang X, Chen Z (2018). Improved modeling of gross primary productivity (GPP) by better representation of plant phenological indicators from remote sensing using a process model. *Ecol Indic* 88(2018): 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.042>
- Wang X, Xiao J, Li X, Cheng G, Ma M, Che T, Dai L, Wang Sh, Wu J (2017a). No consistent evidence for advancing or delaying trends in spring phenology on the Tibetan Plateau. *J Geophys Res: Biogeosci* 122: 3288-3305. <https://doi.org/10.1002/2017JG003949>
- White M, de Beurs K, Didan K, Inouye D, Richardson A, Jensen O, Keefe J, Zhang G, Nemani R, van Leeuwen W, Brown J, de Wit A, Schaepman M, Lin X, Dettinger M, Bailey A, Kimball J, Schwartz M, Baldocchi D, Lee J, Lauenroth W (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Glob Chang Biol* 15: 2335-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>
- Xie Y, Civco D, Silander J (2018) Species-specific spring and autumn leaf phenology captured by time-lapse digital cameras. *Ecosphere* 9(1): 1-21. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2089>
- Xu H, Twine T, Yang X (2014) Evaluating Remotely Sensed Phenological Metrics in a Dynamic Ecosystem Model. *Remote Sens* 6: 4660-4686. <https://doi.org/10.3390/rs6064660>
- Yuan H, Wu Ch, Lu L, Wang X (2018) A new algorithm predicting the end of growth at five evergreen conifer forest based on nighttime temperature and the enhanced vegetation index. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 144(2018): 390-399. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.08.013>
- Zhang X, Goldberg M (2011) Monitoring fall foliage coloration dynamics using time-series satellite data. *Remote Sens Environ* 115(2011): 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.009>

CAPÍTULO II. CROSS-SCALE PHENOLOGICAL MONITORING

- Zhang X, Goldberg M, Yu Y (2012) Prototype for monitoring and forecasting fall foliage coloration in real time from satellite data. *Agric For Meteorol* 158-159(2012): 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.013>
- Zhang X, Jayavelu S, Liu L, Friedl M, Henebry G, Liu Y, Schaaf C, Richardson A, Gray J (2018) Evaluation of land surface phenology from VIIRS data using time series of PhenoCam imagery. *Agric For Meteorol* 256-257(2018): 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.003>
- Zhang X, Tarpley D, Sullivan J (2007) Diverse response of vegetation phenology to warming climate. *Geophys Res Lett* 34(19): 1-5. <https://doi.org/10.1029/2007GL031447>

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

CAPÍTULO III

**Fenología forestal y clima: el caso de *Alnus acuminata* en la Reserva de la
Biosfera Mariposa Monarca**

**Tree phenology and climate: the case of *Alnus acuminata* on the Monarch
Butterfly Biosphere Reserve**

Erika Rocío Reyes González

Manuscrito enviado para su publicación en el libro “Reserva de la Biósfera
Mariposa Monarca: clima, fenología vegetal y conservación” Facultad de Filosofía y
Letras, UNAM.

Estatus del manuscrito: aceptado

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

III.1 Introducción

Los bosques juegan un papel importante para la conservación de la biodiversidad, los flujos de carbono y la prestación de servicios ecosistémicos a escala global. Su explotación ha derivado en la pérdida de su superficie y con ello la pérdida de los bienes que proveen a los seres humanos conocidos como “servicios ecosistémicos”. Los efectos adversos del cambio climático se suman a la problemática relacionada con las afectaciones a estos ecosistemas. La presencia cada vez más común de eventos climáticos extremos pone en riesgo la aportación de los servicios ecosistémicos por parte de los bosques. Otros efectos del cambio climático pueden verse reflejados en modificaciones a los procesos fisiológicos, el crecimiento, la morfología y la fenología de las plantas (Zhang y Brack, 2021).

La fenología se refiere al estudio de los procesos biológicos periódicos de plantas y animales sensibles a los cambios en el clima (Tiwari *et al.* 2021). Uno de los principales elementos que influyen en el desarrollo de los estadios fenológicos de las plantas, es la temperatura; por lo tanto, el calentamiento global y el cambio climático han sido asociados con alteraciones significativas en los patrones fenológicos de las especies vegetales (Farooq y Meraj, 2016). Se ha demostrado que, cambios en las fechas de ocurrencia de algunos eventos fenológicos en plantas -como la floración- han sido inducidos por variaciones en el sistema climático, que derivan en desajustes entre especies (Farooq y Meraj, 2016). El análisis de la información climática en combinación con datos fenológicos ha hecho posible detectar la respuesta de los ecosistemas a los cambios en las variables climáticas.

La información fenológica juega un papel importante para los tomadores de decisiones respecto al manejo de los recursos pues facilita la identificación y evaluación de

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

estrategias que ayuden a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales al cambio climático (Enquist *et al.* 2014). Por lo tanto, es importante llevar a cabo acciones de registro y seguimiento de las fenofases de especies animales y vegetales, ya que se ha considerado a la fenología como un importante indicador de los efectos del cambio climático (Noormets, 2009; USA-National Phenology Network, 2011).

El monitoreo de fenología de especies forestales es una pieza clave para su conservación. Los bosques templados de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) albergan especies forestales de gran importancia por los servicios ecosistémicos que proporcionan a las comunidades que habitan esta área natural protegida. Son además, el sitio de hibernación de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). Por ello se ha puesto especial énfasis en su cuidado y conservación, principalmente de aquellas especies del género *Pinus* y *Abies* utilizadas como refugio por la mariposa monarca durante su estadía en México. Estas especies en conjunto con otras del género *Quercus* y *Cupressus* se encuentran entre las más mencionadas en la literatura como parte de la flora de la reserva (Cornejo *et al.* 2003). Sin embargo, estos bosques albergan otras especies como *Alnus acuminata* que ha sido poco estudiada en la RBMM, a pesar de su presencia e importancia en esta región. Esta especie proporciona bienes, servicios ecosistémicos e ingresos económicos a las comunidades humanas. *Alnus acuminata* es además una especie de importancia ambiental para la regeneración de sitios perturbados ya sea por deforestación o por fenómenos naturales relacionados con lluvias extremas.

La especie *Alnus acuminata* es comúnmente conocida como aile en la RBMM o aliso en algunas regiones de América Central y del Sur de donde es originaria (Furlow, 1979). Se extiende desde el noroeste de México hasta el norte de Argentina. Es un árbol con alturas

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

entre 25 a 30 metros y se distribuye en lugares principalmente de clima templado, con temperaturas desde 4° hasta 27°C y precipitaciones entre 1000 a 3000mm. Se ha documentado en altitudes de 1500 a 3100 msnm y en pendientes con alta humedad (Aulestia *et al.* 2018; Pacheco y Quisbert, 2016; Arguedas y Espinoza, 2007; Furlow, 1979). Prospera en suelos limosos o limo-arenosos de origen aluvial o volcánico.

Se ha demostrado que el aile es eficiente en la captura de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) fijando hasta 6.15mg_{ha}⁻¹ de CO₂ anualmente (Aulestia *et al.* 2018). Debido a su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico, presenta un rápido crecimiento con valores de 1.45 hasta 2.5 m_{año}⁻¹, superior al de especies del género *Pinus* (0.8 m/año; Aulestia *et al.* 2018). Gracias a esta característica ha sido utilizada en acciones de reforestación pues presenta gran capacidad adaptativa y aptitudes para la conservación y regeneración de los bosques y áreas desprovistas de vegetación debido a actividades humanas (Pacheco y Quisbert, 2016). Es una especie que se establece con relativa facilidad en áreas degradadas por actividades agrícolas y pecuarias, formando pequeñas áreas boscosas secundarias (Pacheco y Quisbert, 2016). Se establecen también a las orillas de ríos y arroyos (Easdale *et al.* 2005) otorgándole el nombre de vegetación riverense, riparia o de galería. Este tipo de vegetación desempeña diversas funciones en los ecosistemas, como la estabilización del suelo en los márgenes de los ríos, así como la utilización de los nutrientes disueltos en el agua (Camacho *et al.* 2006). Es además, importante para la recarga de acuíferos y son el hábitat y alimento para la fauna local (Camacho *et al.* 2006; Pacheco y Quisbert, 2016). Tiene además un valor económico para las comunidades locales, gracias a los diferentes usos, entre ellos la construcción y fabricación de muebles (Pacheco y Quisbert, 2016; Tabla III.1)

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

Tabla III.1 Usos y aplicaciones de la especie *Alnus acuminata* en diferentes países

País o región	Usos	Fuente
México (RBMM)	Postes para delimitar predios agrícolas y obtención de madera	Trabajo de campo (2018-2019)
México	Restauración de suelos degradados, como planta de sombra y ornato, obtención de madera, hábitat y alimento para la fauna silvestre, usada como planta medicinal.	CONAFOR, 2021
Brasil	Asociada con maíz, frijol, café y mora silvestre en sistemas agroforestales, sombra para el ganado, linderos para potreros, fabricación de artesanías e instrumentos musicales, puertas, pisos, cercas, muebles, mangos para herramientas, construcción de puentes, producción de madera, leña y carbón, pasta para papel. La corteza se usa para curtir cueros y contra infecciones cutáneas.	Cruz, 2004
Costa Rica		
Ecuador	Madera para la carpintería, para acciones de reforestación, elaboración de muebles, muros o pisos	Pacheco s/a
Colombia	Sistemas silvopastoriles para proporcionar sombra, como cerca viva y para la fijación de	Sánchez <i>et al.</i> 2009

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

nutrientes como el nitrógeno en el suelo que sirven para los cultivos, fabricación de artesanías, pulpa para papel y combustible (leña y carbón)

Perú Forraje para el ganado cuando está verde

El conocimiento de la fenología reproductiva de esta especie es crucial para el desarrollo de estrategias que permitan preservar material genético con gran potencial para programas de reforestación (Kallarackal y Renuka, 2015). Permite además identificar sus mecanismos para mantenerse a través del tiempo en un hábitat particular o extenderse a nuevas áreas; por ejemplo, a través de la sincronización con otras especies como los polinizadores (Kallarackal y Renuka, 2015).

Este trabajo presenta los resultados obtenidos durante un año de monitoreo de la especie *Alnus acuminata* en el paraje “La Entrada” en los límites de la RBMM. Los objetivos de la investigación fueron: a) conocer las condiciones climáticas presentes en la zona de estudio; b) caracterizar el ciclo fenológico de esta especie; c) relacionar los datos fenológicos con las condiciones climáticas de temperatura y precipitación durante el periodo 1980-2020 y durante el año de monitoreo (2018-2019). Se espera que la información generada en este trabajo pueda servir a las comunidades de la RBMM y a otros actores clave para generar futuras estrategias de adaptación ante los cambios en el clima y la degradación que sufren los ecosistemas de esta área protegida; así como, propiciar el aprovechamiento sustentable de esta especie que derive en beneficios económicos y sociales para las comunidades locales de la RBMM.

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

III.2 Método

III.2.1 Selección del sitio de monitoreo

Con el objetivo de caracterizar el ciclo biológico de la especie *Alnus acuminata* se llevaron a cabo observaciones mensuales en el paraje conocido como “La Entrada” en el municipio de Zitácuaro, Michoacán para el periodo de mayo de 2018 a abril de 2019.

A partir de la colaboración entre Alterare, A. C., y el Colegio de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, se logró un acuerdo interinstitucional para establecer sitios de monitoreo fenológico en los parajes donde Alternare A. C. realiza el monitoreo de calidad del agua. Este programa denominado “Conservación de bosque y agua” tiene como objetivo fortalecer las capacidades de las personas que habitan en las comunidades de la RBMM para el monitoreo, recuperación y manejo sustentable de los recursos naturales (Alternare, A.C., 2015)

El paraje “La Entrada” se localiza en la comunidad indígena Crescencio Morales, municipio de Zitácuaro, Michoacán en los límites de la RBMM. El análisis de la climatología del sitio indicó que las precipitaciones medias mensuales fluctuaron entre 5.8mm en el mes de diciembre (mes más seco) a 214.7mm durante el mes de julio, identificado como el mes más húmedo. Respecto a la temperatura, las máximas fluctúan entre 25.2 a 20.7°C, siendo el mes de mayo el más cálido del año. Por otro lado, las temperaturas mínimas oscilan entre 3.1 a 8.7 °C las cuales se presentaron en los meses de enero y junio respectivamente.

Los sitios de monitoreo se localizaron entre las coordenadas 19°30'23.5" de latitud norte y 100°14'00.5" de longitud oeste a una altitud de promedio de 2497 msnm (Figura III.1).

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

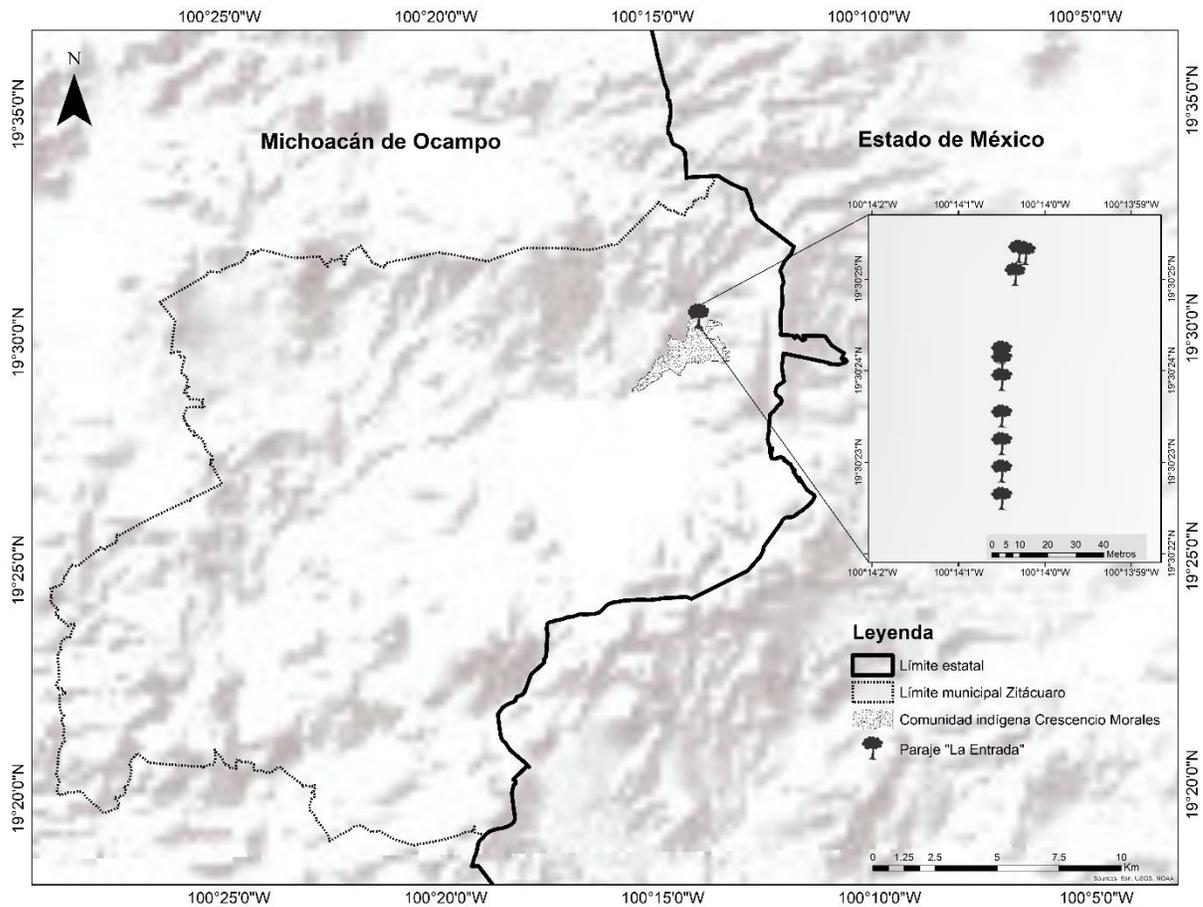


Figura III.1 Ubicación del sitio de monitoreo en el paraje “La Entrada” en la RBMM

III.2.2 Análisis de información climática

Para conocer las condiciones climáticas de la zona de estudio se analizaron los datos diarios de temperatura y precipitación. Se calculó la climatología anual de las temperaturas máximas, mínimas y promedio y de la precipitación para el periodo de 1980-2020, así como para el periodo de monitoreo en campo (2018-2019). Los datos analizados fueron obtenidos de la plataforma <https://daymet.ornl.gov/>. Se calcularon además las anomalías de temperatura y precipitación a fin de detectar cambios en estas variables.

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

Para identificar las tendencias en la temperatura y la precipitación, se recurrió al uso de la prueba Mann-Kendall. De acuerdo con Alencar y Silva (2016), esta prueba estadística se considera ideal para detectar tendencias en series de datos climáticos. El test Mann-Kendal es una prueba no-paramétrica que consiste en la comparación entre los valores que componen una misma serie temporal, en orden secuencial (Alencar y Silva 2016; Cázares y De Cabo, 2018). Cada valor es comparado con todos los valores subsecuentes. Si un valor de un periodo de tiempo posterior es mayor al valor de un periodo anterior, el estadístico S se incrementa en 1; en caso contrario S disminuirá en 1 (Cázares y De Cabo, 2018). En esta prueba, la hipótesis nula (H_0) asume la no existencia de una tendencia; es decir, que los datos son independientes y se encuentran ordenados al azar; mientras que, la hipótesis alternativa (H_1) que asume la existencia de una tendencia en los datos (Cázares y De Cabo, 2018). El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el programa de código abierto RStudio 4.1.0. En todos los casos, la H_0 fue probada con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$).

La información climática generada sirvió además, para identificar las condiciones de temperatura y precipitación promedio bajo las cuales se desarrollaron las fases fenológicas de la vegetación de la RBMM.

III.2.3 Monitoreo fenológico en superficie

Para llevar a cabo el monitoreo fenológico se seleccionaron diez individuos de *Alnus acuminata* mediante un muestreo aleatorio simple. La cantidad de individuos seleccionados se fundamenta en los estatutos propuestos por a USA-NPN (2013), que establece que, para investigaciones científicas se deben seleccionar entre tres y cinco individuos de la misma especie. Se comprobó que los árboles estuvieran visiblemente “saludables”; es decir, libres

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

de enfermedades o plagas (USA-NPN, 2013) y finalmente se obtuvieron sus coordenadas geográficas.

Con base en los protocolos de observación fenológica de la escala BBCH (Meier, 2001) y en criterios propios se determinaron las fases fenológicas a monitorear para *Alnus acuminata*

Las fases fenológicas monitoreadas fueron las siguientes:

- Desarrollo de las hojas: Aparecen los primeros brotes que darán lugar a nuevas hojas. Las hojas se separan, las escamas que las rodean comienzan a abrirse y las hojas comienzan a emerger.
- Floración: aparecen los primeros brotes que darán lugar a la formación de flores. Las primeras flores comienzan a abrirse, hasta llegar a la plenitud de la floración.
- Desarrollo del fruto: los primeros frutos son visibles y alcanzan el tamaño propio de su especie
- Maduración de frutos y semillas: comienza la maduración y coloración de los frutos, disminuye su consistencia y se desprenden con relativa facilidad.

Una vez identificada y registrada la fase o fases fenológicas, se registró además su intensidad expresada en porcentaje. Lo anterior representa una medida de la extensión o presencia de la fenofase (Rosemartin, et al., 2018).

Cada uno de los individuos seleccionados fueron monitoreados durante un año (mayo 2018 a abril 2019). Las observaciones se realizaron de manera mensual, eligiendo un día de la última semana de cada mes y realizando las observaciones lo más cercanas posibles al mismo día en que se realizaron el mes anterior. La periodicidad de observación estuvo

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

sincronizada con las visitas a los sitios de monitoreo de calidad del agua por parte de la organización civil Alternare A. C.

III.2.4 Relaciones fenología-clima

Para identificar el efecto de las condiciones climáticas presentes en el área de estudio, se realizaron modelos de regresión entre la intensidad de cada una de las fenofases monitoreadas en campo y las variables de temperatura máxima, mínima y promedio y la precipitación para los meses y años de monitoreo en campo. El objetivo fue determinar si estas variables tuvieron influencia en el comportamiento fenológico de los individuos de *Alnus acuminata* observados *in situ*. Se calculó además la raíz del error cuadrático medio (RMSE); así como el nivel de significancia estadística ($p < 0.05$).

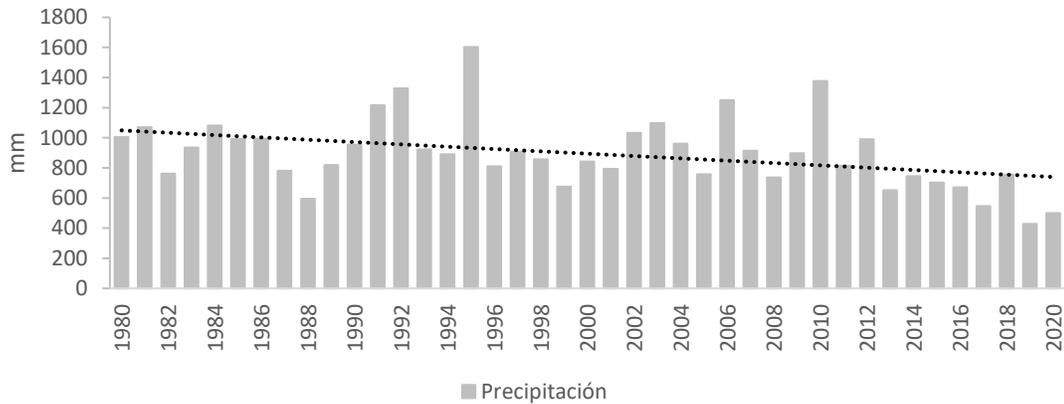
III.3 Resultados

III.3.1 Climatología anual y anomalías de temperatura y precipitación (1980-2020)

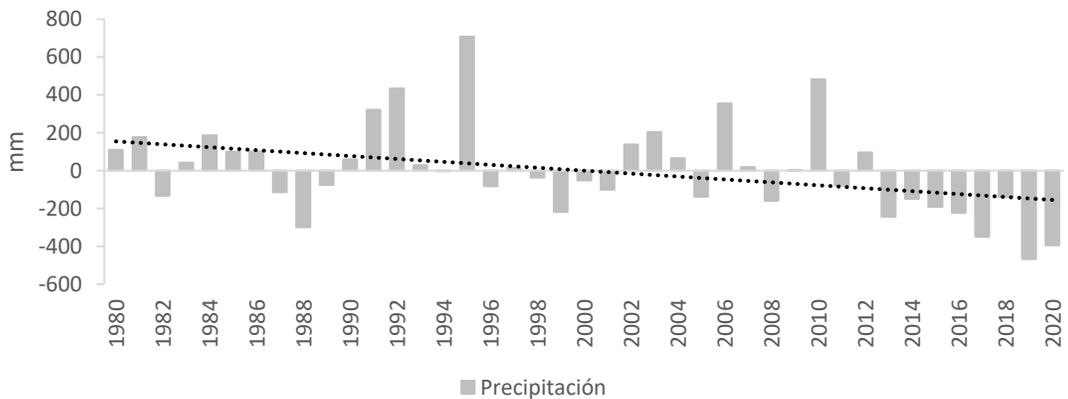
La precipitación promedio calculada para el sitio “La Entrada” fue de 894.5 mm anuales (mediana: 35.0 mm; desviación estándar: 79.8 mm y error estándar 23.0 mm). Se observaron fluctuaciones en los valores anuales durante el periodo de análisis; sin embargo, se identificó una tendencia negativa en la cantidad de precipitación recibida en esta zona ($S = -280.0$; $z = -3.1337$; $p = 0.0017$). Las precipitaciones más bajas se presentaron en los años 2019, 2020 y 2017 con valores de 427.6, 499.2 y 545.9 mm respectivamente. Mientras que, los años más húmedos registrados fueron 1992, 2010 y 1995 con precipitaciones de 1328.5, 1377.8 y 1602.9 mm respectivamente, siendo este último valor el más alto registrado durante el periodo de análisis (Figura III.2a). Tanto las anomalías positivas como negativas correspondieron al 50% de los años analizados. Para los años más húmedos mencionados con anterioridad, se identificaron anomalías de 433.9, 483.2 y 708.4 mm por encima de la

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

media. Los años más secos registraron anomalías negativas de 466.9 mm en el año 2019, 395.3 mm en el año 2020 y 348.7 mm por debajo del valor medio en 2017. (Figura III.2b).



a)



b)

Figura III.2 a) precipitación media anual y b) anomalías de precipitación en el sitio “La Entrada”

Contrario a la variable de precipitación, se obtuvieron tendencias positivas para las temperaturas máximas ($S= 304.0$; $z= 3.4047$; $\rho=0.0006$) y promedio ($S= 303.0$; $z= 3.3961$; $\rho=0.0006$). En el caso de las temperaturas mínimas se encontró una ligera tendencia positiva; sin embargo, no fue estadísticamente significativa ($S= 7.500$; $z= 0.8321$; $\rho=0.4053$). La temperatura máxima promedio de la zona de estudio es de $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mediana: $22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;

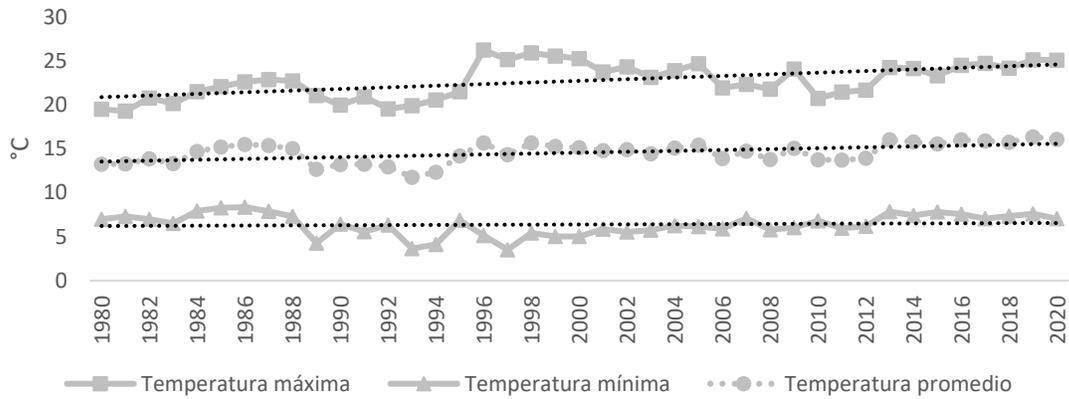
CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

desviación estándar: 1.4°C y error estándar 0.4°C). Se identificó que los años más cálidos fueron 1999 con 25.6°C , 1998 con 25.9°C y 1996 con 26.25°C . Los años con las temperaturas más bajas se registraron en 1997, 1993 y 1994 con 3.5 , 3.6 y 4.1°C , respectivamente (Figura III.3a).

En cuanto a las anomalías calculadas para la variable de temperatura máxima, el 53% de los años analizados presentaron anomalías negativas; mientras que, las anomalías positivas representaron el 47% de los datos. Cabe resaltar que la mayoría de las anomalías positivas se presentaron a partir del año 2000 a la fecha. Las anomalías de temperatura máxima oscilaron entre los -3.4°C y los 3.5°C como valores extremos. Respecto a la temperatura mínima, el valor promedio en “La Entrada” fue de 6.4°C (mediana: 6.8°C ; desviación estándar: 2.1°C y error estándar 0.6°C). Las anomalías de temperatura mínima oscilaron entre -2.9°C y 1.9°C ; mientras que, las anomalías negativas para los años más fríos fueron de -2.9°C , -2.7°C y -2.2°C para 1997, 1993 y 1994 respectivamente. Las anomalías positivas para las temperaturas mínimas correspondieron a los años 1984, 1985 y 1986 con valores entre 1.5 y 1.9°C por encima de la media (Figura III.3b).

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

a)



b)

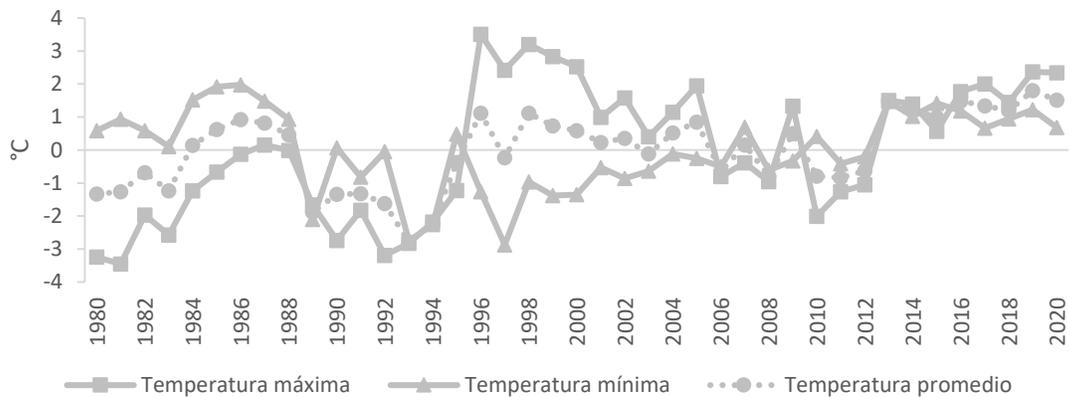


Figura III.3 a) temperaturas máximas, mínimas y promedio anuales y b) anomalías de temperatura en el sitio “La Entrada”

III.3.2 Climatología anual y anomalías de temperatura y precipitación de los años de monitoreo (mayo 2018 -abril 2019)

Durante los meses de monitoreo las precipitaciones máximas se presentaron en agosto con un acumulado mensual de 181.6 mm; mientras que los meses de diciembre a abril fueron los más secos. Con excepción del mes de enero de 2019 (en el cual se presentó una precipitación acumulada de 5.3 mm); en los meses restantes, no se registró precipitación. Respecto a las

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

temperaturas, los valores más altos para las tres variables (máxima, promedio y mínima) se registraron en el mes de abril con valores de 28.1, 17.7 y 7.2 °C, respectivamente. Estas altas temperaturas coincidieron con la intensidad más alta registrada para la fenofase de desarrollo de hojas nuevas de *Alnus acuminata* en el paraje “La Entrada”. Por su parte, las temperaturas más bajas se registraron en el mes de noviembre para las temperaturas máximas y promedio y en los meses de diciembre y enero para las temperaturas mínimas (Figura III.4).

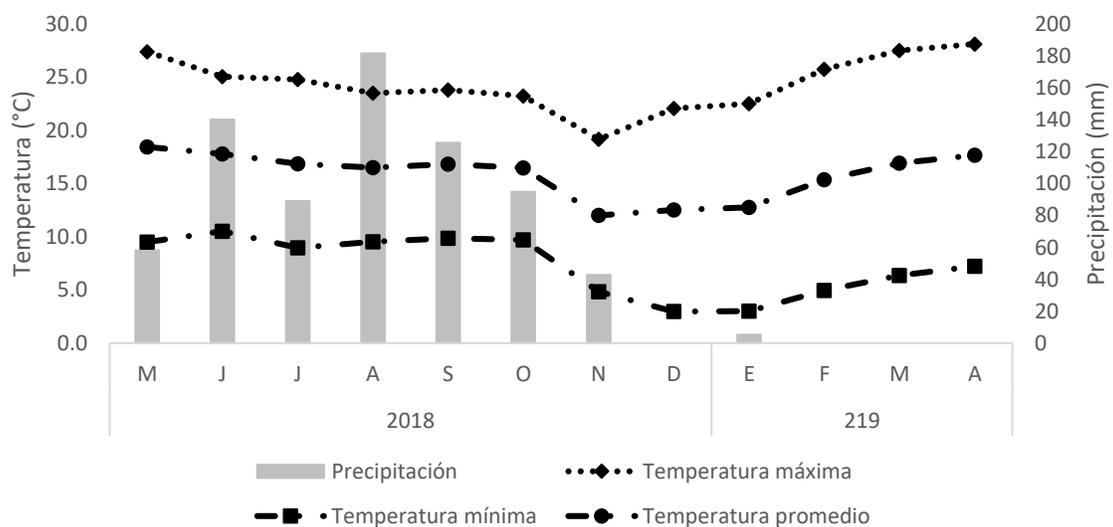


Figura III.4 Climatología mensual registrada durante los meses de monitoreo fenológico de la especie *Alnus acuminata* en el paraje “La Entrada”

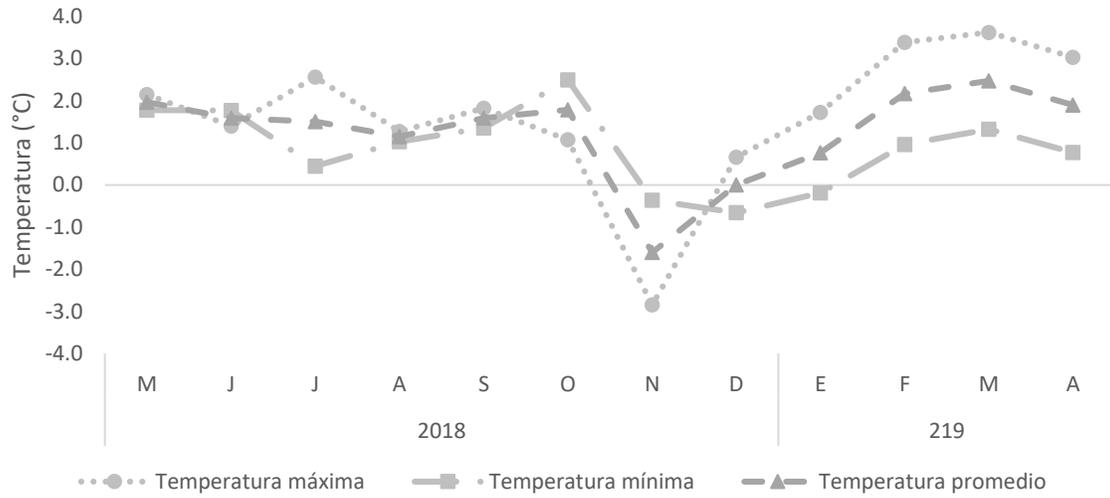
Respecto a las anomalías de precipitación, solamente tres de los doce meses del año de registro presentaron anomalías positivas, siendo estos los meses de mayo, octubre y noviembre de 2019. Por otro lado, a pesar de que el mes más lluvioso en la región fue el mes de agosto, este presentó anomalías negativas al compararse con la climatología promedio del sitio de estudio, registrándose valores de 125.7 mm por debajo de la media (Figura III.5b).

Las temperaturas máximas, mínimas y promedio durante los meses de monitoreo presentaron anomalías positivas durante 11 meses. Únicamente el mes de noviembre presentó anomalías

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

negativas para las tres variables analizadas, además de los meses de diciembre y enero para la variable de temperatura mínima (Figura III.5a).

a)



b)

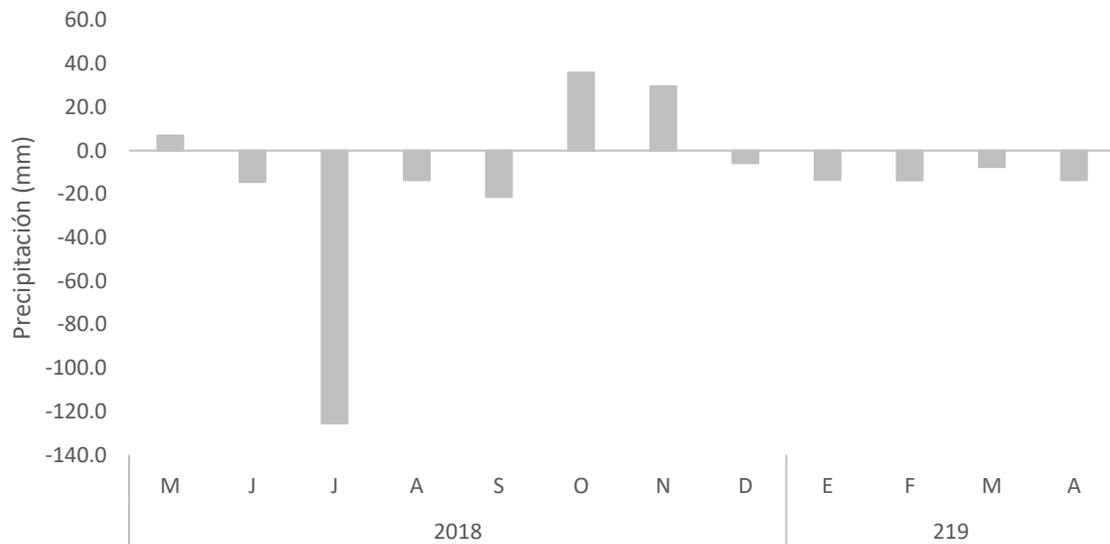


Figura III.5 a) anomalías de temperatura y b) anomalías de precipitación durante los meses de monitoreo fenológico de la especie *Alnus acuminata* en el sitio “La Entrada”

III.3.3 Ciclo fenológico anual. Observaciones *in situ*

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

La especie *Alnus acuminata* presentó desarrollo de hojas (Figura III.6a) durante todo el año de monitoreo; sin embargo, las mayores intensidades de esta fase fenológica se observaron en los meses de primavera-verano (marzo a agosto). La floración (Figura III.6b) se desarrolló en los meses de noviembre a marzo con una mayor intensidad durante los meses de enero y febrero (19.5 y 15% respectivamente). Por su parte, el desarrollo del fruto (Figura III.6c) se presentó desde el mes de agosto hasta el mes de marzo. Los porcentajes máximos de esta fase se reportaron en los meses de agosto, septiembre y octubre (16, 17.5 y 14.5% respectivamente para cada mes). Finalmente, la fase de maduración de frutos y semillas (Figura III.6d) ocurrió principalmente en la temporada de otoño-invierno e inicios de la estación de la estación de primavera, específicamente en los meses de septiembre a abril con porcentajes similares a lo largo de la presencia de la fenofase, con un valor medio de 13% (Figura III.7). A pesar de que algunos autores mencionan que la especie *Alnus acuminata* es una especie caducifolia (Sánchez *et al.* 2009), los individuos observados en este sitio de la RBMM no presentaron esta condición. La especie presentó caída de hojas a lo largo del año de monitoreo; sin embargo, la pérdida de follaje no alcanzó el 100% de intensidad de la fenofase gracias al continuo desarrollo de hojas nuevas (Figura III.8).

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA



Figura III. 6 Fases fenológicas de *Alnus acuminata* observadas en in situ durante el trabajo de campo; a) desarrollo de hojas (25 abril 2019); b) floración (28 de enero 2019); c) desarrollo del fruto (19 de diciembre de 2018) y; d) maduración de frutos y semillas (27 de marzo 2019)

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

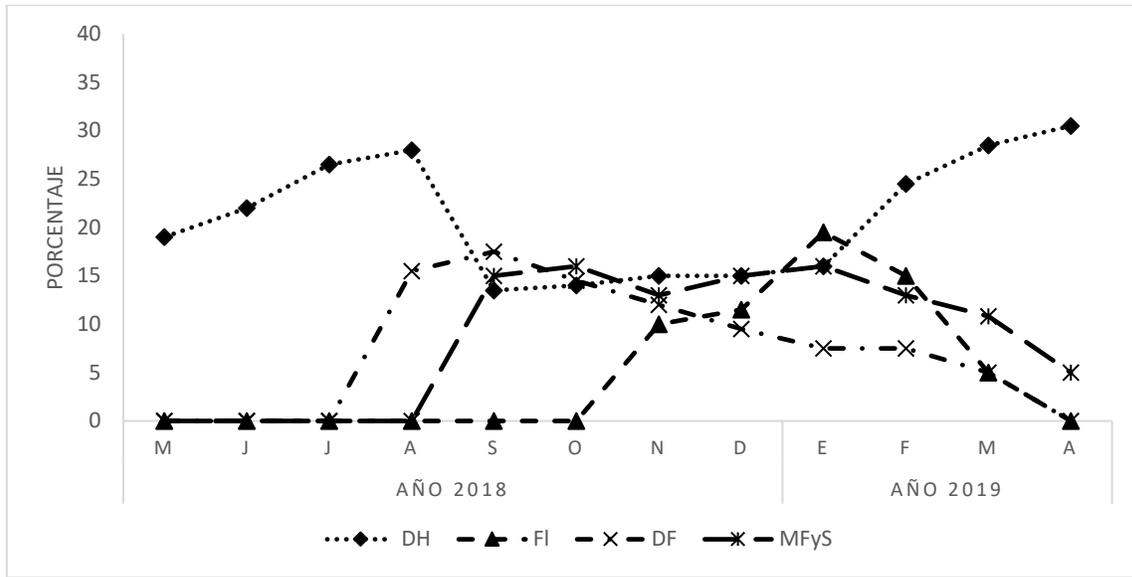


Figura III.7 Fases fenológicas de la especie *Alnus acuminata* y su intensidad en el sitio “La Entrada” en la RBMM Fuente: Elaboración propia con base en el trabajo de campo. (DH: desarrollo de hojas; FI: floración; DF: desarrollo del fruto; MFyS: maduración de frutos y semillas)

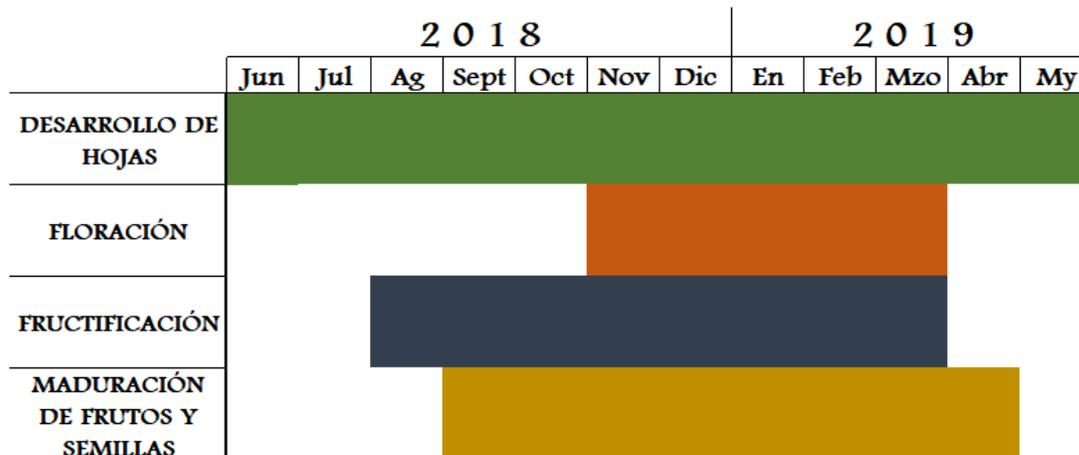


Figura III.8 Ciclo fenológico anual de *Alnus acuminata* en el sitio “La Entrada” de la RBMM

III.3.4 Relaciones fenología-clima

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

De acuerdo con la tabla III.2 la fase fenológica de floración fue la que mejor se explicó en relación con la variable de temperatura mínima, al obtenerse un coeficiente de determinación (R^2) de 0.8285 y el menor RMSE (3.077). Al igual que la temperatura mínima, los análisis estadísticos demostraron que la temperatura promedio también explicó más del 60% de la respuesta fenológica de la floración de *Alnus acumunata* en la RBMM. En el caso del desarrollo de hojas, los coeficientes de determinación resultaron poco satisfactorios; siendo la variable de temperatura máxima la que obtuvo el valor más alto ($R^2= 0.4484$); al mismo tiempo, el valor de RMSE (4.955) fue el más bajo en comparación con las demás variables; mientras que el ρ -valor fue el único con significancia estadística (0.017). En el caso de la formación del fruto, nuevamente se obtuvieron coeficientes de determinación bajos; sin embargo, la temperatura máxima obtuvo el valor más alto, explicando casi en un 40% la variación fenológica de esta fase, y la cual fue la única estadísticamente significativa de todas las variables ($\rho= 0.031$). Finalmente, la maduración de frutos y semillas al igual que la de formación del fruto, presentó valores bajos de R^2 . Únicamente las variables de temperatura máxima y promedio obtuvieron valores satisfactorios de significancia estadística ($\rho= 0.040$ y $\rho= 0.023$ respectivamente) y explicaron más del 35 y 41% de la variación fenológica de esta fenofase.

Tabla III.2 Coeficientes de determinación y RMSE entre la respuesta fenológica de *Alnus acumunata* y las variables climáticas del área de estudio

	Desarrollo de hojas			Floración			Formación del fruto			Maduración de frutos y semillas		
	R^2	RMSE	ρ -valor	R^2	RMSE	ρ -valor	R^2	RMSE	ρ -valor	R^2	RMSE	ρ -valor
Precipitación	0.0009	6.669	0.925	0.4142	5.688	0.023	0.1022	6.484	0.311	0.2222	6.504	0.121
Temperatura máxima	0.4484	4.955	0.017	0.1599	6.812	0.197	0.3856	5.364	0.031	0.2107	6.552	0.133
Temperatura mínima	0.0301	6.571	0.589	0.8285	3.077	<0.05	0.0023	6.836	0.882	0.3557	5.919	0.040
Temperatura promedio	0.2525	5.768	0.095	0.652	4.384	0.001	0.1559	6.287	0.203	0.4158	5.637	0.023

Nota: Significancia estadística <0.05

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

Discusión

El monitoreo de las especies presentes en la RBMM permite conocer la dinámica estacional de la vegetación, así como identificar cambios relacionados con los efectos del cambio climático y la variabilidad climática. La especie *Alnus acuminata* presentó un desarrollo fenológico caracterizado la aparición de hojas nuevas a lo largo del año de observación, con un máximo en primavera-verano. Sin embargo, en países como Colombia *Alnus acuminata* es reportada como una especie caducifolia, perdiendo sus hojas en la temporada de secas o bajas temperaturas (Sánchez *et al.* 2009). El desarrollo de hojas presente a lo largo del año de monitoreo pudiera estar relacionado con las tendencias positivas en la temperatura que se identificaron en este paraje de la reserva. A pesar de que la condición climática ejerce una influencia importante en el comportamiento semicaducifolio de *Alnus acuminata*, la parte genética juega también un papel fundamental para dar lugar a esta condición. Sin embargo, es necesario llevar a cabo mayores esfuerzos de monitoreo para corroborar este planteamiento.

Los usos de esta especie son variados, generalmente está asociada con sistemas silvopastoriles (Sánchez *et al.* 2009; Cruz 2004). En el caso de la RBMM su uso se encuentra orientado a la extracción de madera y la elaboración de postes para la delimitación de terrenos. El aile produce gran cantidad de hojarasca rica en nitrógeno y de rápida descomposición que se incorpora al suelo en forma de materia orgánica mejorando su fertilidad, aumentado su porosidad y capacidad de infiltración (Sánchez *et al.* 2009).

Alnus acuminata es importante en las etapas sucesionales tempranas de los bosques de pino-encino siendo relevante en los procesos de regeneración (Cruz, 2004). Es una especie de rápido crecimiento que se recupera de forma natural en áreas perturbadas o por efecto de

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

lluvias extremas o inundaciones (Easdale *et al.* 2005). Esta característica la hacen una especie óptima para realizar acciones de reforestación en la RBMM con objetivos de conservación. Tiene gran capacidad de fijación de CO₂ y múltiples usos para las comunidades locales (Guerrero *et al.* 2018). Sin embargo; en México y particularmente en la RBMM su uso es limitado para este tipo de acciones para las cuales la preferencia por especies del género *Pinus* y *Abies* ha sido prioritaria (Aulestia *et al.* 2018).

Es evidente que *Alnus acuminata* posee características de importancia para las poblaciones humanas. Los cambios en el sistema climático ponen en riesgo la variedad de servicios ecosistémicos que esta y otras especies proporcionan. Puesto que la temperatura es uno de los principales moduladores del comportamiento fenológico de las especies, el monitoreo ayuda a identificar avances en la fecha de aparición de las fases de primavera en los bosques y es uno de los principales indicadores del cambio climático a nivel mundial (Kallarackal y Renuka, 2015). Se ha reportado en la literatura que algunas especies -entre ellas *Alnus acuminata*- presentaron modificaciones en la floración y fructificación en bosques de Ecuador relacionados con parámetros meteorológicos (Bendix *et al.* 2006). En este trabajo, se demostró que las temperaturas mínimas ejercieron un efecto importante en la floración de esta especie; por lo que será necesario identificar la influencia de las tendencias positivas en la temperatura en esta zona de la RBMM. Por lo tanto, es necesario el monitoreo tanto de las variaciones en los valores medios de la temperatura y precipitación como en las fases fenológicas a fin de identificar estas modificaciones y sus posibles repercusiones en los ecosistemas y en las comunidades locales que dependen de los recursos naturales presentes en ellos.

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

Al igual que otros tipos de vegetación, el desarrollo fenológico de *Alnus acuminata* es modulado por las variables climáticas principalmente por la temperatura. Se ha encontrado que la vegetación rivereña presenta cambios debido a las variaciones climáticas y altitudinales de los lugares en los que se establece (Camacho *et al.* 2006). Por lo tanto, es necesario su monitoreo para establecer modelos de cosecha local para su extracción y utilización sostenible. El monitoreo fenológico es necesario para conocer las fechas de fenofases clave para la reproducción y proliferación de la especie, la edad del árbol para reproducirse y la fecundidad (Pacheco y Quisbert, 2016). Es útil para la producción de semillas en especies forestales con objetivos de conservación o para la obtención de bienes como madera y otras materias primas, así como para abastecer de semillas a los programas de reforestación (Márquez *et al.* 2010).

La vegetación rivereña es poco estudiada en México, a pesar de los múltiples beneficios que provee tanto a la población como al medio ambiente (Camacho *et al.* 2006). El monitoreo de *Alnus acuminata* es indispensable debido a los servicios ecosistémicos que proporciona a las comunidades de esta ANP, además de ser una especie de importancia para la fauna local.

El monitoreo fenológico es esencial para conocer las posibles consecuencias en el comportamiento fenológico de las especies, así como las repercusiones en los servicios ecosistémicos y en las poblaciones humanas que se presentarán debido a los aumentos en las temperaturas y disminución en las precipitaciones reportadas en este trabajo. Por otro lado, el conocimiento de la fenología de las especies puede ser aplicado no solo a cuestiones ecológicas o de conservación. Este tipo de información está relacionada con las comunidades humanas que habitan dentro de las ANP en el caso de México, así como para la gestión de los recursos naturales y la toma de decisiones. Este trabajo permitió identificar la falta de

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

estudios de otras especies distintas a aquellas pertenecientes al género *Pinus* y *Abies* en la RBMM. Sobre todo, de aquellas relacionadas con los sistemas sociales, puesto que la RBMM es más que el sitio de hibernación de la mariposa monarca, alberga también comunidades humanas que co-existen con la biodiversidad que alberga esta ANP. En el caso del municipio de Zitácuaro, Michoacán, los bosques proporciona de servicios ecosistémicos a una población de 155 534 personas, de las cuales el 18.5% se dedican a actividades del sector primario (INEGI, 2010).

Será necesario analizar las repercusiones de estas condiciones en el desarrollo fenológico de *Alnus acuminata* y otras especies de importancia para la conservación de los bosques de la RBMM y la provisión de servicios ecosistémicos.

Conclusiones

La RBMM alberga una gran diversidad de flor y fauna. Especies como *Abies religiosa* ha sido ampliamente estudiada debido a su estrecha relación con el fenómeno migratorio de la mariposa monarca. Sin embargo, otras especies de importancia local como el aile han sido poco estudiados a pesar de los múltiples servicios ecosistémicos que proporciona. Esta ANP no solo es el hábitat de especies animales y vegetales. Antes de ser decretada como área protegida, comunidades humanas habitaban estos ecosistemas. Estas comunidades han aprovechado los recursos naturales para obtener bienes y servicios para su supervivencia. La prestación de estos servicios por parte de los ecosistemas depende de la conservación de los mismos. Los actuales cambios en las variables climáticas ponen en riesgo no solo a las especies, sino a las comunidades locales que habitan los bosques templados de la RBMM. El presente trabajo identificó tendencias positivas en las temperaturas máximas y promedio; así como una tendencia negativa en las precipitaciones. Se determinó, además el papel que

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

juegan las temperaturas, principalmente mínimas en del desarrollo fenológico en la floración de *Alnus acuminata* y algunos efectos de las temperaturas máximas y promedio en el desarrollo y maduración de los frutos y semillas. La combinación de ambas situaciones pone sobre la mesa la preocupación por conocer la respuesta de los ecosistemas de esta ANP ante estas variaciones y las consecuentes repercusiones en los sistemas sociales. A pesar de que la fenología de esta especie mostró una relación más estrecha con la temperatura, es necesario realizar trabajos de investigación para identificar las consecuencias de la disminución en las precipitaciones, considerando el tiempo de respuesta de la vegetación después de la presencia de lluvia.

Referencias

- Alencar K y Silva R (2016) “Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó-Pernamcuco-Brasil” en *Revista Geográfica de América Central*. 1(58): 295-307. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.58-1.12>
- Alternare A. C. (2015) “Conservación de bosque y agua” [En línea]. Disponible en: <https://www.alternare.org/>. [Accesado el 10 de abril de 2021]
- Arguedas M, y Espinoza D (2007) “Problemas fitosanitarios del jaúl (*Alnus acuminata* Kunth) en Costa Rica” en *Kurú: Revista Forestal*. 4(10):2007
- Aulestia E, Jiménez L, Quizhpe J, y Capa D (2018) “*Alnus acuminata* kunth: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono” en *Bosques Latitud Cero*. 8(2): 64-74
- Bendix J, Homeier J, Cueva E, Ortiz, EP S, Breckle, MR y Beck E (2006). “Seasonality of weather and tree phenology in a tropical evergreen mountain rainforest” en *International Journal of Biometeorology*. DOI 10.1007/s00484-006-0029-8
- Camacho F, Trejo I, y Bonfil C (2006) “Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe, Morelos, México” en *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 78:17-31
- Casares M y De Cabo L (2018) “Análisis de tendencias de variables indicadoras de calidad de agua para el riachuelo (CuencaMatanza-Riachuelo, Argentina)” en *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 34(4): 651-665. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.08>
- CONAFOR (2021) *Alnus acuminata* H.B.K. Paquetes tecnológicos [En línea] Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/882Alnus%20acuminata.pdf>. Accesado el 10 de marzo de 2021

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

- Cornejo G, Casas A, Farfán B, Villaseñor J, e Ibarra G (2003) “Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México” en Boletín de la Sociedad Botánica de México. 73(2003): 43-62
- Cruz A (2004) “La importancia del hilite blanco (*Alnus acuminata subsp. Arguta*(schlecht) Furlow) (Betulaceae) en la sombra de cafetales de Xohitlán de Vicente Suárez, Puebla, México. Tesis de maestría en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 213
- Easdale T, Sabaté S, y Grau A (2005) “Don’t camp beside the river: structure and dynamics of Andean alder (*Alnus acuminata*) forests affected by river floods, northwestern Argentina en *Revista Chilena de Historia Natural*. 78:711-722
- Enquist C, Kellermann J, Gerts K, y Miller A (2014) “Phenology research for natural resource management in the United States” en *International Journal of Biometeorology*. Pp.12
- Farooq M y Meraj G (2016) #Tree Phenology and climate change” en *J&K Envis Neweletter*. 3(1): 9
- Furlow, J (1979) The systematics of the American species of alnus (Betulaceae). *Journal of (the New England Botanical Club*. 81(825): 1-248
- INEGI (2010) “Censo de Población y vivienda 2010” [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/>. Accesado el 18 de abril de 2021
- Kallarackal J, y Renuka R (2015) “Phenological Implications for the Conservation of Forest Trees” Capítulo 4. Pp. 21
- Meier U (2001) Estudio de plantas mono y dicotiledóneas. BBCH monografía. [En línea] Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura, edición 2001, pp. 149. Disponible en: http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_veroeff/bbch/BBCH-Skala_spanisch.pdf [Accesado el 20 de junio de 2021]
- Pacheco (s/a) Construcción de modelo de cosecha del aliso (*Alnus acuminata*) en Acero marca. Pp. 9
- Pacheco E. y Quisbert A (2016) “Modelos de aprovechamiento sostenible del Aliso (*Alnus Acuminata* Kunth) en zona de ladera de bosque de niebla” en *Journal of the Selva Andina Biosphere*. 4(1): 24-38
- Rosemartin A, Denny E, Gerst K, Marsh L, Posthumus E, Crimmins T y Weltzin J (2018) “USA National Phenology Network Observational Data Documentation” U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1060, Pp. 24 <https://doi.org/10.3133/ofr20181060>
- Sánchez L, Amado M, Criollo P, Carvajal T, Roa J, Cuesta A, Conde A, Umañan A, Bernal L y Barreto L (2009) “El aliso (*Alnus acuminata* H.B.K.) como alternativa silvopastoril en el manejo sostenible de praderas en el trópico alto colombiano” Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Pp. 56
- Tiwari P, Verma P y Raghubanshi A (2021) Forest phenology as an indicator of climate change: impact and mitigation strategies in India en Islam N, van Amstel A (editores) *India: climate change impacts, mitigation and adaptation in developing*. Pp. 305
- USA-National Phenology Network (2011) Phenology as an indicator of environmental variation and climate change impact. Abril de 2011, pp. 2, Tucson, Arizona

CAPÍTULO III. FENOLOGÍA FORESTAL Y CLIMA

- USA-National Phenology Network (2013) “How to observe. Nature’s Notebook Plant and Animal Phenology Handbook” USA-NPN Education & Engagement Series 2013-001. Pp. 53
- Zhang B y Brack C (2021) Urban forest response to climate change: A case study in Camberra. En *Urban Forestry and Urban Greening*. 57(2021): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126910>

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

CAPÍTULO IV

Monitoreo fenológico transescalar para *Pinus hartwegii* Lindl en el centro de México
utilizando índices de vegetación tradicionales y un índice de vegetación *ad hoc*

Erika Rocío Reyes González^{1*}; Ángel Refugio Terán Cuevas²; Leticia Gómez Mendoza³; Víctor L. Barradas⁴

Manuscrito en preparación para enviarse a: Remote Sensing of Environmten

Resumen

Los cambios en los patrones climáticos han tenido repercusiones en la mayoría de los ecosistemas del mundo. Estos cambios se han visto reflejados en modificaciones de los ciclos fenológicos de las especies. En el caso de México se espera que los bosques templados sean de los ecosistemas más afectados por los efectos del cambio climático; mientras que las especies que habitan en grandes altitudes serán vulnerables a los aumentos en las temperaturas. Este trabajo presenta los resultados del análisis transescalar del bosque templado del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Durante un año (junio 2018 a mayo de 2019) se recabaron datos *in situ* del ciclo fenológico de *Pinus hartwegii* Lindl. Se calcularon índices de vegetación como el NDVI y se propone el uso de un nuevo índice de vegetación (Normalized Evergreen Forest Vegetation Index; NEFVI). Estos índices fueron evaluados y validados a partir de los datos fenológicos obtenidos en campo. Se encontró que el NEFVI ($R^2=0.7098$; $RMSE=0.0171$) caracterizaron con mayor precisión la fenología del desarrollo de hojas de estos ecosistemas perennifolios en comparación con el NDVI ($R^2=0.2627$; $RMSE=0.0364$). El análisis transescalar provee las bases para generar datos fenológicos por medio de percepción remota que representen con mayor exactitud la fenología observada *in situ*. Esta información puede ser utilizada a futuro para llenar vacíos de información dadas las dificultades para recabar datos en superficie a grandes escalas espaciales y temporales.

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

IV.1 Introducción

La fenología es el estudio de los cambios estacionales que son resultado de la respuesta adaptativa de las especies a las variaciones climáticas (Maignan *et al.* 2008; Hmimina *et al.* 2013; Ogunbadewa *et al.* 2014). El monitoreo de la vegetación en largos periodos de tiempo es esencial para entender los procesos biológicos de los ecosistemas (Ogunbadewa *et al.* 2014), lo cual se fundamenta en el registro sistemático y continuo de eventos como la floración, fructificación, la caída de hojas y la senescencia (Soudani *et al.* 2012). Referirse a la “fenología de la vegetación” es un término general que puede ser estudiado desde la perspectiva biológica de la fenología de las plantas (*in situ* o Ground-based phenology) o desde la perspectiva de la percepción remota o “Land Surface Phenology” (Berra y Gaulton, 2021).

Existen múltiples métodos para estimar la fenología de la vegetación, como observaciones por medio de ciencia ciudadana (White *et al.* 2009; Elmore *et al.* 2016), cámaras de repetición o “phenocams” (Choi *et al.* 2011; Sugiura *et al.* 2013; Kosmala *et al.* 2016) y percepción remota (Colditz *et al.* 2009; Huete *et al.* 2011). El análisis de las imágenes satelitales ayuda a determinar los ciclos estacionales de los ecosistemas (Choi, *et al.* 2011) y estudiar la fenología de la superficie terrestre (D’ Odorico *et al.* 2015) a través de la generación de índices de vegetación (IV).

En la actualidad se ha desarrollado un número significativo de estos índices que han sido utilizados para estimar parámetros fenológicos relacionados con la estación de crecimiento de la vegetación. Entre los índices más utilizados se encuentra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), el cual es un indicador del verdor de la vegetación basado en las bandas roja e infrarroja de los sensores (Coops *et al.* 2010; Hassan y Rahman. 2012). Este índice ha sido utilizado como

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

herramienta para identificar el estado de salud de los ecosistemas, entre ellos los bosques templados presentes en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT; Leon, 2019; Correa *et al.* 2021). Sin embargo, los estudios sobre la fenología de la vegetación a través de monitoreo en superficie en esta área natural protegida son escasos. Algunos de estos trabajos están orientados en caracterizar la estructura del límite superior del bosque de *Pinus hartwegii* (Alfaro *et al.* 2017) o en analizar la variación genética de *Pinus hartwegii* en diferentes niveles de altitud (Viveros *et al.* 2009).

Se conoce que la vegetación del APFFNT es el resultado de la combinación de factores tales como ubicación, altitud, geología, edafología y climatología. De acuerdo con Rzedowski (1978), los tipos de vegetación presentes en esta área son bosques de coníferas. Con base en el género dominante pueden existir bosques de pino (*Pinus*), de oyamel (*Abies*), de oyamel-pino (*Abies-Pinus*), de pino-encino (*Pinus-Quercus*), de aile (*Alnus*) y combinarse con la presencia de pastizales (CONANP 2016). *Pinus hartwegii* es la especie de pino que se distribuye a mayores altitudes en el mundo entre 2800 y 4200 msnm, incluso se han encontrado algunos ejemplares aislados hasta los 4400 msnm. Sin embargo, tiene una distribución geográfica limitada (Perry, 1991). Se distribuye en las cimas de las montañas desde el noreste de México hasta el Salvador en América central (Perry, 1991; Alfaro *et al.* 2017; Alfaro *et al.* 2020). En el caso particular de México su distribución se limita a sitios de gran altitud como el Nevado de Colima, el Nevado de Toluca, el Popocatepetl e Iztaccíhuatl, la Malinche, el Pico de Orizaba entre otros ubicados en el Cinturón Volcánico Transmexicano (Calderón de Rzedowski y Rzedowski, 2005; Alfaro *et al.* 2017; Alfaro *et al.* 2020). En el caso particular del APFFNT, esta especie habita entre 3600 y 4200 msnm y conforma bosques monoespecíficos en conjunto con el pastizal de alta montaña (Alfaro *et al.* 2017; Andrade *et al.* 2021). Esta especie tiene adaptación a bajas temperaturas extremas de hasta -30°C

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

y la convierte en una de las más vulnerables a los aumentos en la temperatura (Alfaro *et al.* 2017). Tienen además un gran valor ambiental y provee de servicios ecosistémicos a comunidades humanas. Actualmente la información fenológica de los bosques de *Pinus hartwegii* es limitada. Sin embargo, se sabe que la disminución de la precipitación y el aumento en las temperaturas tendrán implicaciones en esta especie (Andrade *et al.* 2021). Se estima que en los ecosistemas forestales que se localizan a mayores altitudes, el aumento en la temperatura y el incremento en el dióxido de carbono puede derivar en cambios en su fenología (Correa *et al.* 2021). Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un monitoreo de los efectos de estas variables en los ciclos de vida de esta especie. Dada la falta de datos *in situ*, el uso de herramientas de percepción remota puede ayudar a llenar los vacíos de información relacionados con observaciones en campo. A pesar de que los sensores remotos permiten analizar la fenología de la vegetación de grandes áreas de la superficie terrestre y en intervalos de tiempo regulares (Ganguly *et al.* 2010; Liu *et al.* 2015; Baumann *et al.* 2017); se encuentran expuestos a perturbaciones atmosféricas y bajas resoluciones temporales. Estos inconvenientes pueden derivar en baja calidad de los datos generados; por lo tanto, es necesario validar la precisión de los parámetros fenológicos obtenidos por medio de percepción remota al comparar con los datos obtenidos en campo (Ground-based phenology) (Liang *et al.* 2011; Sigiura *et al.* 2013). En el caso de México los datos generados por medio de imágenes de satélite no han sido validados con observaciones obtenidas directamente en campo debido a la poca abundancia de estas. El análisis transescalar permite identificar o generar índices de vegetación capaces de representar con precisión el ciclo fenológico de especies perennifolias como *Pinus hartwegii* en los bosques templados del centro de México. Por lo tanto, los objetivos de este trabajo fueron: a) monitorear *in situ* la fenología anual de la especie *Pinus hartwegii*; b) caracterizar la respuesta fenológica de la vegetación del

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

APFFNT a partir de la implementación de índices de vegetación (NDVI); c) implementar un nuevo índice de vegetación (NEFVI) para especies características de los bosques templados del centro de México y; d) validar los IV para caracterizar el ciclo fenológico de la vegetación de bosques templados a partir de los datos observados *in situ*.

IV.2 Materiales

IV.2 1 Sentinel-2

Para realizar el cálculo de índices de vegetación, en este trabajo se recurrió al uso de imágenes satelitales Sentinel-2. La misión “Copernicus Sentinel-2” es una constelación de dos satélites idénticos con órbitas polares. Fue diseñado por un grupo de alrededor de 60 compañías liderado por “Airbus Defence”. Sentinel-2A fue puesto en órbita el 23 de junio de 2015; mientras que Sentinel-2B fue lanzado el 7 de marzo de 2017. Su escala temporal es de 10 días con un satélite y 5 días en conjunto en condiciones de ausencia de nubes. El instrumento óptico cuenta con 13 bandas espectrales (cuatro bandas con 10 m, seis bandas a 20 m y 3 bandas a 60 m de resolución espacial) que operan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (Tabla IV.1). El ancho de la franja es de 290km (European Space Agency, 2015; Borrás *et al.* 2017). Sentinel-2 es un satélite de órbita heliosincrónica y se encuentra a 786 km de altitud. Para asegurar la mínima cobertura de nubes y la mejor iluminación del sol, toma una imagen a las 10:30 am (Borrás *et al.* 2017). El acceso a las imágenes satelitales de Sentinel-2 es libre, otra de las características que favoreció su uso para esta investigación.

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Tabla IV.1 Características de las bandas de Sentinel-2. Elaboración propia con base en European Space Agency, 2015 y Borrás et al. 2017

Banda	Resolución espacial (m)	Longitud de onda (µm)
B1 - Aerosol	60	443
B2 - Blue	10	490
B3 - Green	10	560
B4 - Red	10	665
B5 – Red edge 1	20	705
B6 – Red edge 2	20	740
B7 – Red edge 3	20	783
B8 – Near Infrared (NIR) 1	10	842
B8B -- Near Infrared (NIR) 2	20	865
B9 – Water vapour	60	940
B10 - Cirrus	60	1375
B11 – SWIR 1	20	1610
B12 – SWIR 2	20	2190

Sentinel-2 provee diferentes tipos de productos dependiendo de su nivel de procesamiento. El producto de nivel 0 no se entrega a los usuarios ya que se trata de datos de la imagen en bruto (metadatos). Este tipo de producto constituye la base para los productos de nivel 1. Del mismo modo que los productos nivel 0, los productos nivel 1A tienen restringido su acceso por parte del público en general. Se trata de productos que se obtienen después de descomprimir los datos en bruto nivel 0. Por otro lado, el nivel 1B es el nivel más bajo que se encuentra disponible para los usuarios. Este tipo de producto

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

proporciona imágenes corregidas radiométricamente y de este producto se derivan los de nivel 1C. Los productos de nivel 1C es el resultado de la utilización de un Modelo Digital de Elevación (MDE) para proyectar la imagen en coordenadas geográficas. Proporciona valores de reflectancia en la parte superior de la atmósfera. Finalmente, el nivel 2A, proporciona imágenes de reflectancia del fondo de la atmósfera. Estos productos se derivan de los de nivel 1C. Los productos de nivel 2A pueden ser generados por los usuarios, utilizando como entrada los productos de nivel 1C (European Space Agency, 2015)

IV.2.2 Satellite pour l'Observation de la Terre (SPOT-7)

Para delimitar aquellas áreas con píxeles de vegetación de *Pinus hartwegii*, se utilizó una imagen satelital SPOT-7. Este es un satélite comercial que fue puesto en órbita el 30 de junio de 2014 y continúa en operación hasta la actualidad. El satélite SPOT-7 es idéntico a SPOT-6 y se espera que ambos generen información hasta el año 2024 (European Space Agency, 2022a). Se trata de un satélite heliosincrónico y orbita a 694 km de altitud. La resolución temporal de SPOT-7 es de 1 a 3 días; sin embargo, se puede asegurar la obtención de una imagen diaria si operan en conjunto SPOT-6 y SPOT-7. Cuenta con una imagen pancromática a 1.5 m de resolución; una imagen multiespectral con 4 bandas espectrales (rojo, verde, azul e infrarrojo cercano) a 6 m de resolución, una imagen a color con refinado pancromático a 1.5 m de resolución y un paquete que incluye una imagen pancromática a 1.5m y una imagen multiespectral a 6m (CONAE, 2017; European Space Agency, 2022b; Tabla IV.2). Las imágenes pueden contar con dos niveles de procesamiento. L1A o primario; este nivel, hace referencia a que la imagen no se encuentra ortorectificada; mientras que, el nivel L2A cuenta con imágenes que han sido

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

ortorectificadas (CONAE, 2017). En el caso de la imagen utilizada en esta tesis cuenta con un nivel de procesamiento que asegura que se encuentra ortorectificada.

Tabla IV.2 Características de las imágenes SPOT-7. Elaboración propia con base en CONAE, 2017

Imagen	Resolución espacial (m)	Banda	Longitud de onda (µm)
Pancromática	1.5		0.45 a 0.745
Multiespectral	6	B1- Rojo	0.625 a 0.695
		B2- Verde	0.530 a 0.590
		B-3 Azul	0.455 a 0.525
		B4- Infrarrojo cercano	0.760 a 0.890

IV.3 Métodos y área de estudio

El área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca cuenta con una superficie estimada en 53,912 ha. Tiene como coordenadas extremas 18°52' y 19°23' de latitud norte y 99°33' y 99°52' de longitud oeste con una elevación máxima de 4558 msnm. Abarca los municipios de Toluca, Temascaltepec, Tenango del Valle, Almoloya de Juárez, Amanalco, Calimaya, Coatepec Harinas, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec; este último, representa la mayor superficie y el de mayor población dentro del área natural protegida (Endara *et al.* 2012; Toscana y Granados, 2015; CONANP 2016).

En este sitio predomina la especie *Pinus hartwegii*, también conocido como “pino de las alturas” por encontrarse en elevaciones mayores a los 4000 msnm (Alfaro *et al.* 2017).

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Tres sitios de monitoreo de esta especie fueron establecidos en esta ANP a fin de contar con datos *in situ*, para validar la información generada por medio de imágenes satelitales sobre la fenología de especies perennifolias de los bosques templados del Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura IV.1). En cada uno de estos puntos de monitoreo se identificó que *Pinus hartwegii* era la especie dominante debido a la abundancia de individuos de esta especie en el sitio de estudio. Lo anterior permitió contar con al menos 10 individuos en cada sitio de observación para su monitoreo (Liang *et al.* 2011; USA-National Phenology Network, 2013) dando un total de 30 individuos totales. Los árboles seleccionados fueron marcados y georreferenciados y se corroboró, que los individuos estuvieran visiblemente “saludables”; es decir, libres de enfermedades o plagas (USA-National Phenology Network, 2013). Cada uno de los individuos seleccionados fueron monitoreados durante un año a partir de junio de 2018 y hasta mayo de 2019. Las observaciones se realizaron de manera mensual.

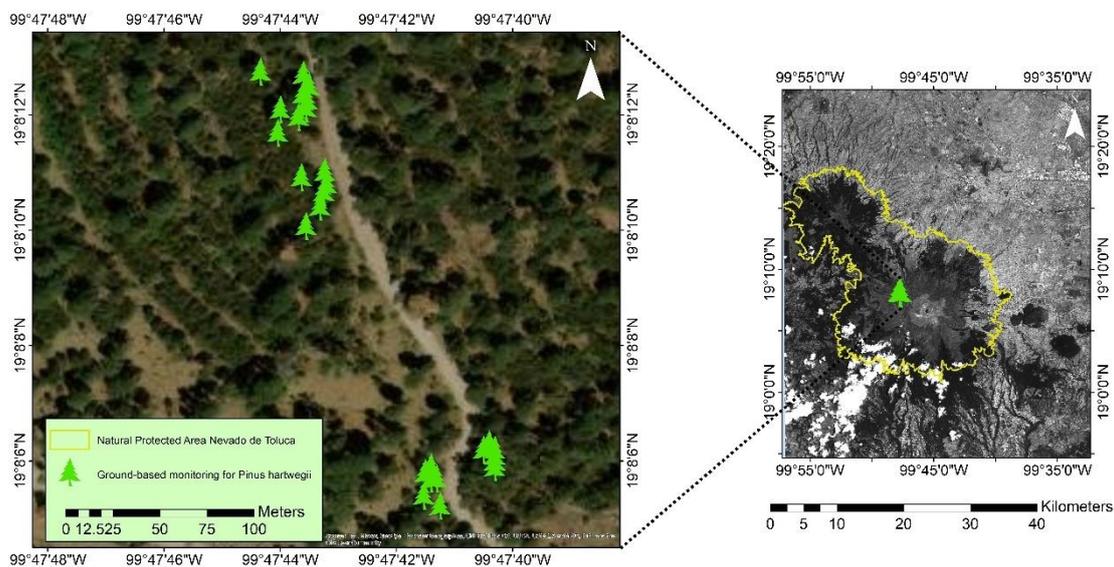


Figura IV.1 Ubicación de los sitios de monitoreo en superficie en el APFFNT.

Elaboración propia con base en CONANP, 2022

IV.3.1 Fases fenológicas monitoreadas

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Con base los protocolos de observación de la USA-NPN (2013) y el trabajo realizado por Cortés *et al.* (2011) se determinaron las fases fenológicas a monitorear para *Pinus hartwegii*:

- a) Desarrollo de las hojas: las acículas comienzan a desarrollarse y/o crecer.
- b) Floración: cuando uno o más estróbilos masculinos fueron visibles en la planta
- c) Desarrollo del fruto: cuando uno o más conos o estróbilos femeninos inmaduros son visibles en la planta
- d) Maduración de frutos y semillas: cuando uno o más conos femeninos comienzan a cambiar de color a café y las brácteas comienzan a abrirse para permitir la dispersión de las semillas
- e) Senescencia: sin actividad aparente

Se calculó la intensidad de cada fase fenológica medida en porcentaje de presencia en el árbol (USA-National Phenology Network, 2019). Considerando a la copa de cada árbol (ramas y hojas) como una totalidad (100%), se determinó qué parte de ese porcentaje representaba la fenofase monitoreada durante cada visita a campo. Este porcentaje se dividió entre las hojas maduras y la(s) fase(s) fenológica(s) monitoreada(s). Los porcentajes considerados fueron: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% y 100%;

VI.3.2 Monitoreo fenológico por medio de percepción remota

El empleo de técnicas de percepción remota ha cobrado relevancia en el monitoreo y evaluación de la fenología de la vegetación. (Berra y Gaulton, 2021). Las resoluciones temporales, espaciales y espectrales de las imágenes Sentinel-2 favorecieron la utilización

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

de este satélite para generar la fenología de la población de *Pinus hartwegii* en el APFFNT.

IV.3.3 Procesamiento de las imágenes

Las imágenes utilizadas en este trabajo corresponden a productos nivel 1C. Esto significa que se trata de imágenes que incluyen correcciones radiométricas y geométricas, además la ortorectificación y el registro espacial en un sistema de referencia global con una precisión inferior al píxel (European Space Agency, 2015). Estas imágenes presentan valores de reflectancia en la parte superior de la atmósfera, por lo que fue necesario realizar una corrección atmosférica para generar imágenes con niveles de reflectancia a nivel de superficie. La corrección atmosférica se realizó en el Sistema de Información Geográfica de código abierto Quantum GIS (QGIS) 3.26.1, utilizando el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), desarrollado por Congedo (2021).

VI.3.4 Cálculo de NDVI

La periodicidad de análisis de la información se basó en la disponibilidad de imágenes libres de nubes cercanas a las fechas de monitoreo en campo. Para el análisis de la dinámica estacional de la vegetación se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI; Rouse *et al.* 1974).

Se utilizaron las imágenes más cercanas a las fechas de monitoreo en campo. Esto dependió de la disponibilidad de imágenes libres de nubes, sobre todo en la temporada de lluvias (mayo – septiembre). En caso de no encontrar imágenes disponibles se obtuvo la imagen cercana a la misma fecha de monitoreo en campo del siguiente año (2020; Tabla IV.3).

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Tabla IV.3 Fechas de monitoreo en campo y fecha de la imagen

Fecha de monitoreo en campo	Fecha de imagen de satélite
8 de junio de 2018	01 de junio de 2018
01 de julio de 2018	21 de julio de 2018
01 de agosto de 2018	20 de agosto de 2018
07 de septiembre de 2018	28 de septiembre de 2020
05 de octubre de 2018	08 de octubre de 2020
09 de noviembre de 2018	08 de noviembre de 2018
07 de diciembre de 2018	08 de diciembre de 2018
18 de enero de 2019	22 de enero de 2019
15 de febrero de 2019	06 de febrero de 2019
22 de marzo de 2019	23 de marzo de 2019
26 de abril de 2019	17 de abril de 2019
24 de mayo de 2019	07 de mayo de 2019

El cálculo del NDVI fue realizado mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (3)$$

Dónde:

NIR= valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

Red= valores de reflectancia en la banda del rojo

Al utilizar las bandas de Sentinel-2 el cálculo del NDVI se realizó a partir de la ec. 4

$$NDVI = \frac{Banda\ 8-Banda\ 4}{Banda\ 8+Banda\ 4} \quad (4)$$

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

VI.3.5 Generación de índice de vegetación *ad hoc* (Normalized Evergreen Forest Vegetation Index)

Con el objetivo de caracterizar el ciclo fenológico de la vegetación presente en los bosques templados del centro de México se recurrió a la generación de un índice de vegetación *ad hoc*. Dado que la mayoría de los índices de vegetación representan con mayor exactitud el ciclo fenológico de especies caducifolias cuyos cambios son más evidentes. La generación de este índice responde a la necesidad de contar con un IV que represente con precisión las variaciones fenológicas de especies perennifolias como *Pinus hartwegii* presentes en los bosques templados del centro de México. En primera instancia, se analizó la respuesta espectral de la especie de interés. Para realizar se calcularon los valores de reflectancia de los píxeles con vegetación de *Pinus hartwegii*. Se observó que el valor mayor de reflectancia correspondió a la banda verde; mientras que, los valores más bajos de reflectancia se encontraron en las bandas roja y azul (Figura IV.2).



Figura IV.2 Análisis espectral de la vegetación de interés.

Gracias al análisis anterior, se comprobó que los valores de reflectancia en las bandas azul y rojo fueron los más bajos y se obtuvo un promedio de ambas bandas (Ec. 5). Este

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

proceso permitió obtener el valor promedio de reflectancia de la vegetación de interés en las bandas de menor respuesta y no solamente de la banda roja como en el caso del NDVI.

$$F1 = \frac{Blue+Red}{2} \quad (5)$$

Dónde

F1= promedio de las bandas azul y roja

Blue= valores de reflectancia en la banda azul

Red= valores de reflectancia en la banda roja

Bajo la lógica de cálculo del NDVI se generó la ecuación 4. En esta ecuación se realizó una resta a los valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (0.78 – 0.90µm) de los resultados obtenidos en la ecuación 1. Lo anterior permitió obtener la respuesta de la vegetación en la longitud de onda del infrarrojo cercano, eliminando la baja respuesta en las bandas roja y azul. Finalmente, se generó la ecuación 7 a fin de normalizar los valores obtenidos (ec. 6)

$$F2 = NIR - F1 \quad (6)$$

Dónde:

F2= Diferencia entre la banda del infrarrojo cercano y el promedio de las bandas azul y roja

NIR= valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

F1= promedio de las bandas azul y roja

$$NEFVI = \frac{NIR-F1}{NIR+F1} \quad (7)$$

Dónde:

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

NEFVI= Normalized Evergreen Forest Vegetation Index

NIR= valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

FI= promedio de las bandas azul y roja

Con base en las bandas de Sentinel-2, el cálculo del NEFVI se desglosa en la ecuación 8.

$$NEFVI = \frac{Banda\ 8 - \frac{Banda\ 2 + Banda\ 4}{2}}{Banda\ 8 + \frac{Banda\ 2 + Banda\ 4}{2}} \quad (8)$$

IV.3.6 Monitoreo fenológico transescalar

El análisis transescalar se llevó a cabo utilizando parte de la metodología propuesta por Liang *et al.* (2011). Este método se basa en el paradigma de la “Dinámica Jerárquica de Parches” propuesta por Wu en 1999. Este paradigma proporciona una forma para simplificar la complejidad de la naturaleza con un enfoque de escala. De acuerdo con este enfoque, es posible construir un índice para representar la fenología del paisaje (Landscape Phenology) siguiendo la misma organización jerárquica de un ecosistema (individuos, poblaciones, comunidades, paisaje). Por lo anterior, es posible generar información fenológica a nivel de paisaje a través de transiciones en escala de mediciones obtenidas para organismos individuales. La información generada es similar a la fenología de un parche del ecosistema y es comparable en tamaño a la resolución media de la fenología obtenida por medio de imágenes de satélite (Liang y Schwartz, 2009).

Debido a las diferencias entre los ecosistemas objeto estudio en esta tesis (bosque templado de coníferas, con *Pinus hartwegii* como especie dominante y de carácter perene) y el realizado por Liang *et al.* (2011; bosque mixto con distintas especies tanto perenes como caducifolias), se omitieron algunos pasos de la metodología propuesta por Liang *et al.* (2011), principalmente sobre la diferenciación, presencia y abundancia de especies;

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

así como las fracciones de caducifolios y coníferas, esto gracias a la relativa homogeneidad en cuanto a la diversidad de especies presentes en el sitio de estudio. Únicamente los píxeles sin vegetación (suelo desnudo o pastizal) fueron diferenciados y omitidos para caracterizar la fenología de la especie objeto de estudio. Los datos obtenidos en campo fueron escalados para obtener la fenología hasta el nivel de poblaciones dadas las características espaciales y ecológicas de la vegetación presente el área APFFNT. Esta metodología permitió comparar en escalas similares la fenología de la población de *Pinus hartwegii* recabada en *in situ* con aquella generada a través de percepción remota.

IV.3.7 De la fenología de individuos a la de poblaciones

De acuerdo con Liang y colaboradores (2011) es posible realizar una interpolación espacial al corroborarse que existe una autocorrelación espacial entre las observaciones fenológicas de los individuos registrados. La autocorrelación espacial, de acuerdo con lo mencionado por Celemín (2009), es un procedimiento geográfico que proporciona información sobre el tipo de asociación que existe entre unidades espaciales vecinas. Se dice que existe autocorrelación espacial cuando hay un patrón en el comportamiento de una variable con base en su ubicación geográfica (Celemín, 2009). De manera simple, se define a la autocorrelación espacial como la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa. La autocorrelación espacial refleja el grado en que los objetos en una unidad geográfica son similares a otros objetos en unidades geográficas próximas (Vilalta, 2005). Si los valores de las unidades espaciales vecinas son similares, se habla de una autocorrelación espacial positiva; mientras que el caso contrario, se encuentra asociado con una autocorrelación negativa; es decir cuando los valores de las unidades vecinas son diferentes (Cepeda y Velázquez, 2005; Celemín, 2009). Por otro lado, no

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

existe autocorrelación espacial, cuando no sucede ninguna de las situaciones anteriores; esto significa que cada uno de los valores de las unidades vecinas presentan valores producidos de forma aleatoria (Celemín, 2009). El análisis de autocorrelación espacial se llevó a cabo con los individuos monitoreados en campo y a partir del valor del estadístico Índice de Morán¹ (*I* de Morán) se corroboró este supuesto. Sin embargo, al identificarse que sí existía dicha autocorrelación se intentó interpolar los datos, pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios dada la limitada área geográfica monitoreada. En este caso, los mismos autores proponen obtener la media aritmética de la intensidad de la fase fenológica para individuos de la misma especie y así obtener la fenología de la población de *Pinus hartwegii* en el APFFNT; por lo que, se calculó la media de cada una de las fases fenológicas obtenidas *in situ*. Cabe resaltar que para obtener la fenología de la población los autores proponen obtener la media de 15 a 20 individuos. Por lo anterior, el número de árboles monitoreados (30) en esta ANP fueron suficientes para representar la fenología de la población, ya que debido a la altitud a la que se realizaron los monitoreos *in situ* esta fue la especie representativa o dominante en el área de estudio.

Una única imagen SPOT-7 fue utilizada en este trabajo para delimitar las áreas con vegetación de *Pinus harwegii* en el sitio de estudio. Esta delimitación aseguró que los valores de NDVI y NEFVI correspondieran únicamente al tipo vegetación de interés, para

¹ De acuerdo con Vilalta (2005), el Índice de Morán es similar en diseño al coeficiente de correlación de Pearson. Sus valores varían entre +1 y -1. El valor +1 significa una autocorrelación positiva perfecta; mientras que el valor -1 está asociado con una autocorrelación negativa perfecta. Por su parte, un valor de cero indica un patrón espacial completamente aleatorio, sin ningún tipo de autocorrelación. El estadístico *I* de Morán se basa en que la asociación de valores en el conjunto de datos está dada por una matriz de distancias o contigüidad que predefine los valores vecinos. El coeficiente *I* de Morán está sujeto también a la prueba de significancia estadística de valores *Z*; es decir, bajo es supuesto de una distribución normal. La fórmula para calcular el coeficiente *I* de Morán es:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} W_{ij}} * \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

n = es el número de unidades (áreas o puntos en el mapa)

W_{ij} = es la matriz de distancias que define si las áreas o puntos geográficos *i* y *j* son o no vecinos

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

ser comparados con la fenología de la población observada *in situ* en escalas similares; es decir, a nivel de poblaciones. A partir de la imagen SPOT-7 del día 26 de febrero de 2017 con resolución espacial de 1.5 m, se diferenciaron los tipos cubiertas en el área de estudio y realizó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo de mínimas distancias. Se realizaron entrenamientos utilizando otros algoritmos como el de “máxima verosimilitud”, “correlación espectral” y “distancia de Mahalanobis”. Sin embargo, se decidió utilizar el algoritmo de mínimas distancias por ser el que representó con mayor precisión los distintos tipos de cubiertas presentes en la zona de estudio (Figura IV.3).

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

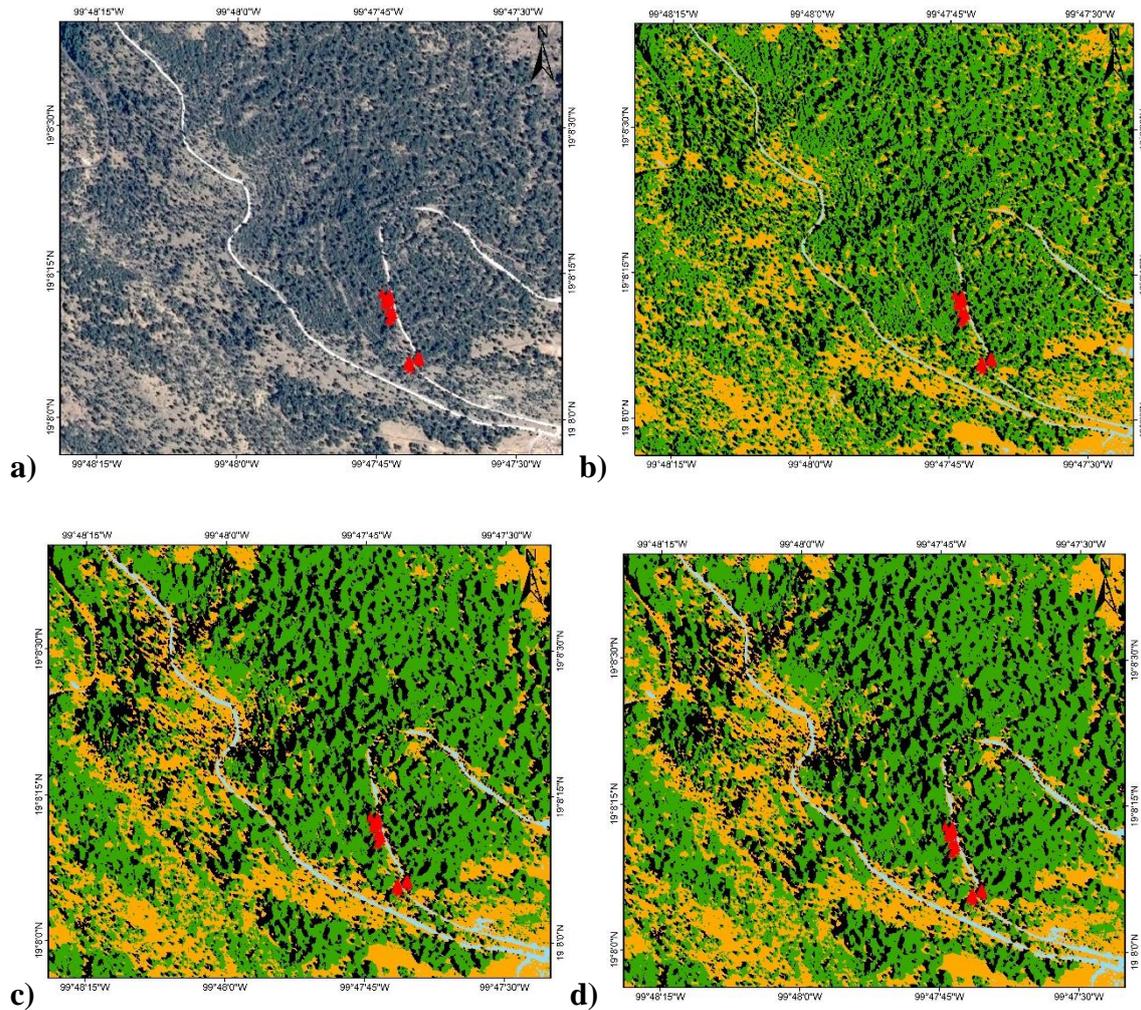


Figura IV.3 a) Imagen satelital SPOT-7 del del sitio de estudio y su comparación con los resultados de la clasificación supervisada utilizando el algoritmo: b) mínimas distancias; c) máxima verosimilitud y; d) Distancia de Mahalanobis

Una vez identificados los pixeles correspondientes a la vegetación arbórea, se eliminaron aquellos con coberturas de suelo sin vegetación y de pastizales y los pixeles correspondientes a las sombras generadas por el dosel de los árboles. Gracias a la resolución espacial de la imagen SPOT-7 y al conocimiento de la zona de estudio, de manera manual se identificaron en la imagen resultante aquellas zonas de vegetación arbórea distinta a *Pinus hartwegii*. Finalmente, con la imagen resultante se obtuvieron los

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

valores de NDVI y NEFVI y se aseguró que estos representaran únicamente a la vegetación de *Pinus hartwegii*.

IV.3.8 Comparación en ambas escalas de monitoreo

Para identificar si la fenología generada por medio de percepción remota fue similar a la caracterizada por medio de observaciones *in situ*, se generaron modelos de regresión lineal entre la fenología de la población de *Pinus hartwegii*; es decir, los valores promedio de la intensidad de las fases fenológicas de los 30 individuos monitoreados y los valores de NDVI y NEFVI correspondientes a los pixeles del tipo de vegetación objeto de estudio de este trabajo. Se obtuvo, el coeficiente de determinación y se calculó el error cuadrático medio (RMSE).

IV.4 Resultados

IV.4.1 Fenología de *Pinus hartwegii* observada *in situ*

Con base en la información obtenida gracias el trabajo de campo, se observó que durante los meses de primavera-otoño se presentó el desarrollo de acículas, así como la aparición de conos masculinos y femeninos en los individuos monitoreados de *Pinus hartwegii*. Particularmente, el desarrollo de acículas se observó durante los meses de marzo hasta diciembre, con un máximo en el mes de junio (25%). Seguido del desarrollo de hojas, se presentó la fase desarrollo del fruto (conos femeninos) a partir del mes de septiembre y hasta el mes de diciembre; mientras que su maduración fue registrada durante los meses de enero a agosto. Por otro lado, la presencia de conos masculinos se observó en los meses de enero a abril (Figura IV.4).

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

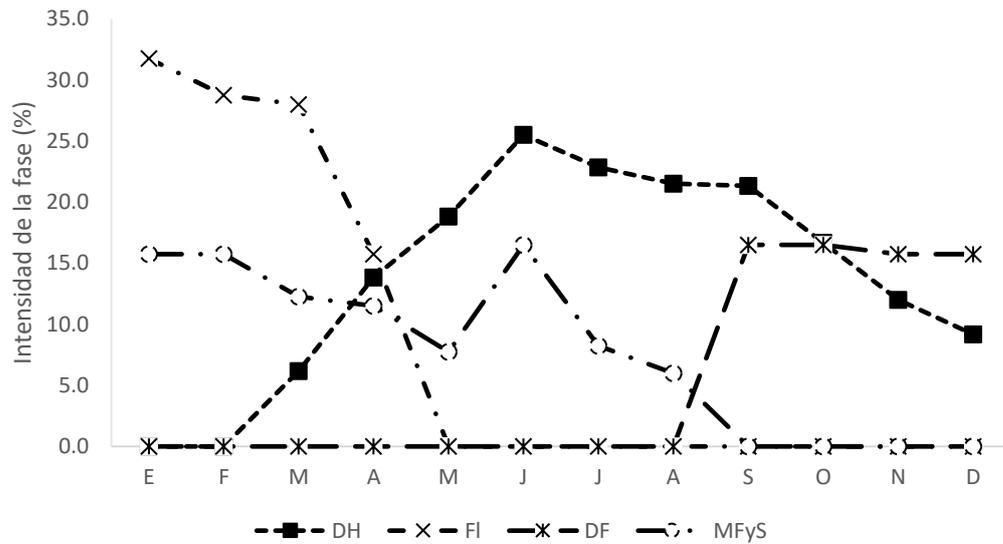


Figura IV.4 Fases fenológicas e intensidades de la población de *Pinus hartwegii* observadas durante un año de monitoreo en el APFFNT. (DH: desarrollo de hojas; FI: floración; DF: desarrollo del fruto; MFyS: maduración de frutos y semillas)

IV.4.2 Land surface phenology

El análisis del ciclo fenológico de la vegetación por medio de imágenes satelitales indicó que los valores de NDVI obtenidos para el área de estudio se encontraron en el rango de 0.42 a 0.54. El valor máximo obtenido correspondió al mes de octubre (0.54); mientras que, el valor mínimo se identificó para el mes de febrero (0.42). Respecto a los resultados de NEFVI, el valor mínimo se registró en el mes de febrero (0.38); mientras que, el valor máximo se presentó en el mes de julio (0.49). En el caso del NDVI los valores máximos coincidieron con la temporada de lluvias para esta región de México (Figura IV.5)

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Mínimo

Máximo

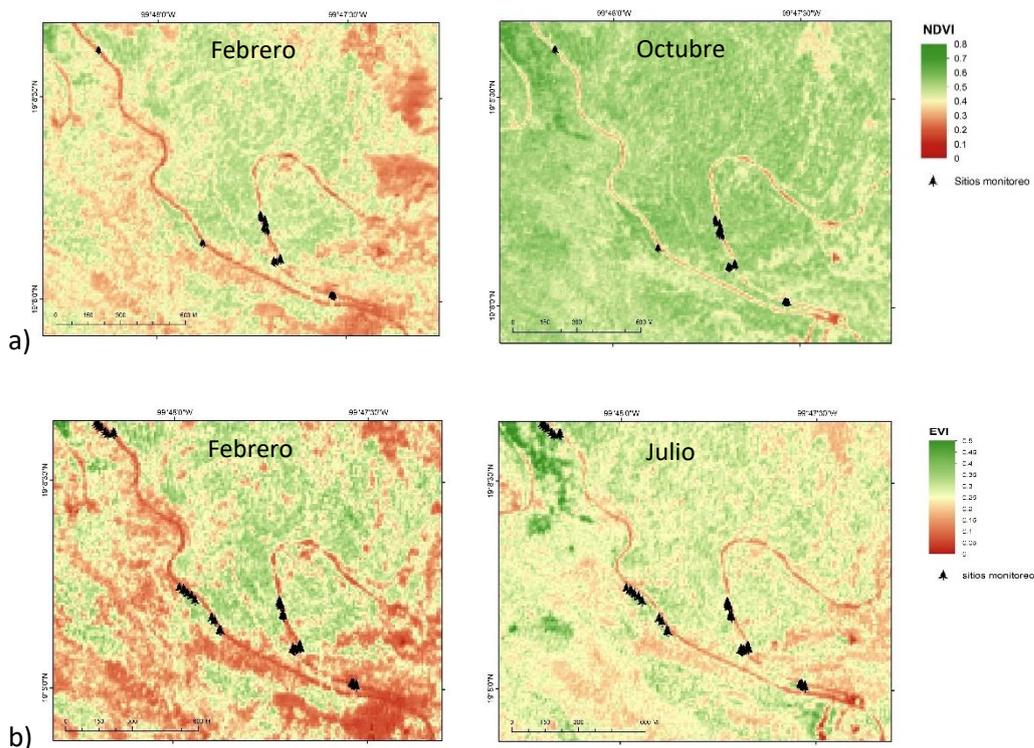


Figura IV.5 Meses en los que se presentaron los valores máximos y mínimos para: a)NDVI y; b)NEFVI

IV.4.3 Comparación de observaciones en superficie y percepción remota

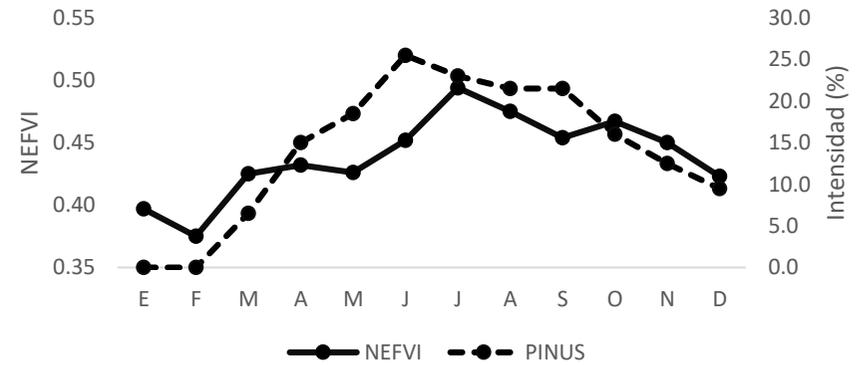
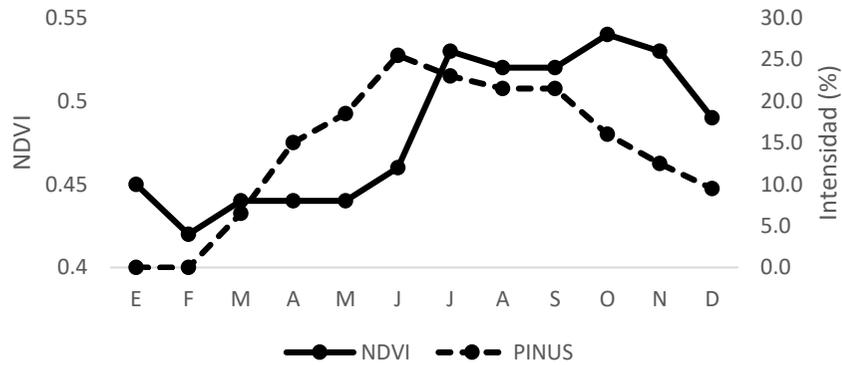
Gracias al análisis fenológico transescalar de las poblaciones de *Pinus hartwegii* en el APFFNT, se logró identificar la precisión con la cual los índices de vegetación caracterizaron el ciclo fenológico de esta especie en comparación con lo observado en superficie. Respecto a la fenología observada en campo, la intensidad máxima de desarrollo de las hojas se registró en el mes de junio (25.5%). Los valores mínimos se observaron en los meses de diciembre y marzo con intensidades de 9.5% y 6.2% respectivamente. En el caso del NEFVI, los valores mínimos de este IV coincidieron con los meses de febrero (0.38 vs 0%) y diciembre (0.42 vs 9.2%) respecto a lo observado en campo. Referente a las correspondencias entre los valores máximos, en ningún caso los

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

meses con los valores más altos en los dos IV calculados coincidieron con las intensidades más altas reportadas en superficie. En el caso de NEFVI estos valores (0.49) se desfasaron un mes con relación al mes de junio, en el cual se observaron las intensidades mayores en la fenofase de desarrollo de hojas (25.5%). En el caso del NDVI, este desfasamiento fue mayor (cuatro meses) al detectarse el valor máximo en el mes de octubre (0.54; Figura IV.6a). Para el caso de la floración, esta fenofase se desarrolló en los meses de enero a abril; siendo estos meses en los cuales se presentó la mayor (31.8%) y menor intensidad (15.8%) respectivamente (Figura IV.6b). El desarrollo de esta fase coincidió con los valores más bajos de NDVI (entre 0.42 y 0.45) y NEFVI (entre 0.48 y 0.33). Por su parte, el desarrollo de los frutos se observó en los meses de septiembre a diciembre con intensidades entre 16.5 y 17.8%. En este caso, las intensidades más altas de esta fenofase, coincidieron también con los valores más altos de NDVI (0.54; Figura IV.6c). Finalmente, la maduración de frutos y semillas estuvo presente durante ocho meses del año; a partir de enero y hasta septiembre; sin embargo, se observaron fluctuaciones en la intensidad, a lo largo del tiempo de monitoreo. Los valores máximos estuvieron desfasados cuatro meses para el caso de NDVI y un mes en el caso del NEFVI, al compararlos con el valor máximo de intensidad de la fenofase de maduración de frutos y semillas (16.5%), el cual fue registrado en el mes de junio (Figura IV.6d).

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

a) Desarrollo de hojas



b) Floración

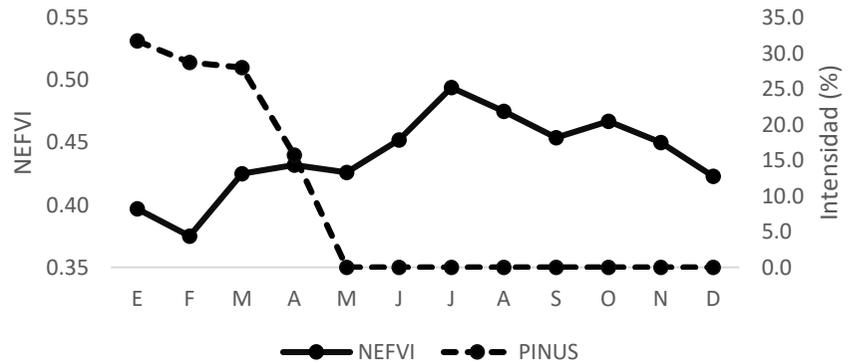
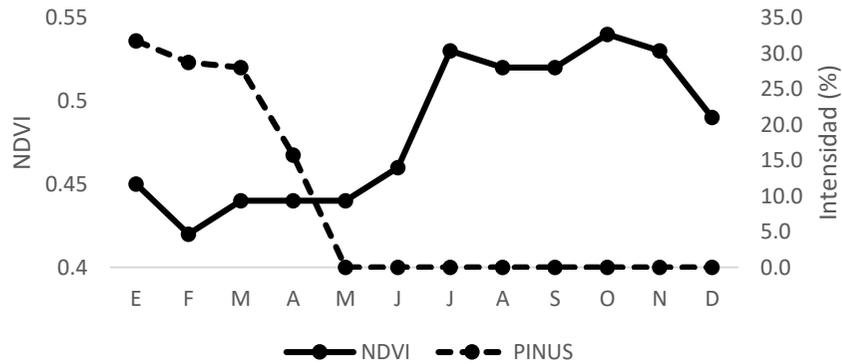
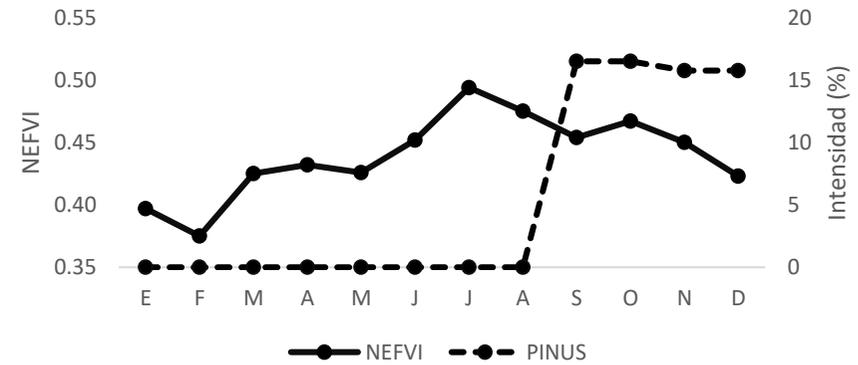
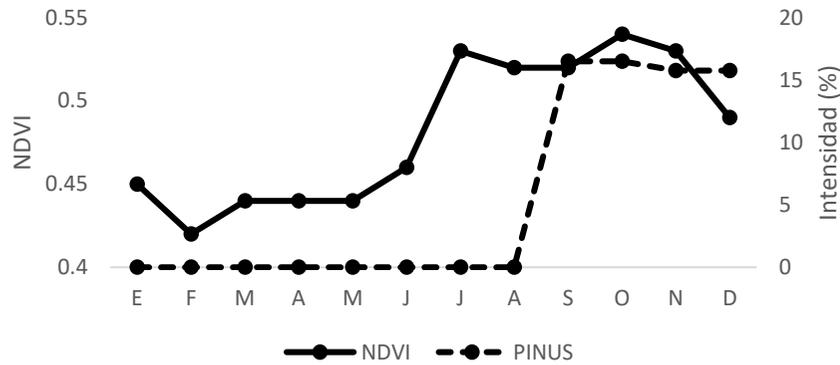


Figura IV.6 Fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de *Pinus hartwegii* en el APFFNT

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

c) Desarrollo del fruto



d) Maduración de frutos y semillas

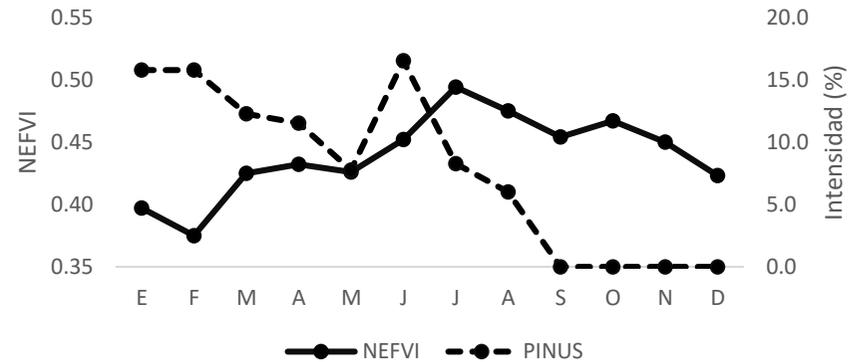
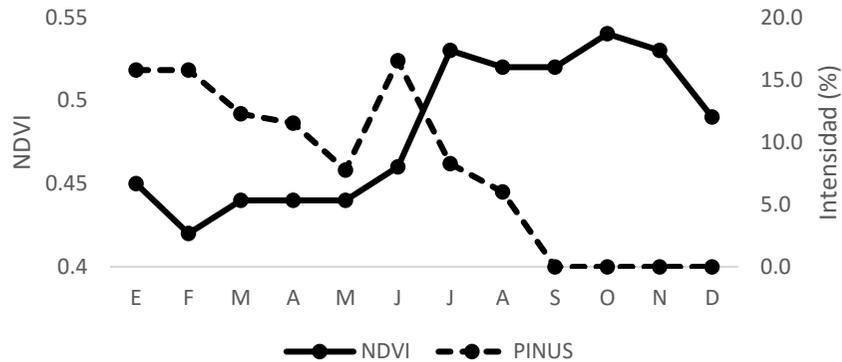


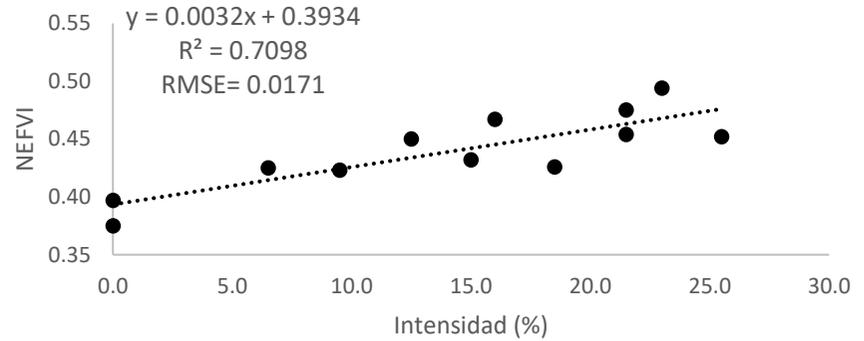
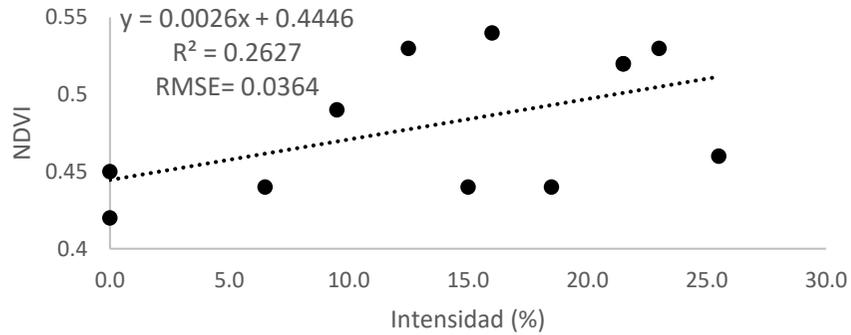
Figura IV.7 Fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de *Pinus hartwegii* en el APFFNT

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Los modelos de regresión lineal demostraron que el NEFVI caracterizó con mayor precisión la fase de desarrollo hojas ($R^2 = 0.7098$ y $RMSE = 0.0171$) de las poblaciones de *Pinus hartwegii*. Lo anterior, demostró que, este IV reflejó las variaciones en el verdor relacionado con la aparición de nuevas hojas a lo largo del año de monitoreo. En el caso del NDVI, a pesar de ser uno de los índices de vegetación más utilizados para caracterizar la fenología de los ecosistemas mexicanos, mostró resultados poco satisfactorios ($R^2 = 0.2627$ y $RMSE = 0.0364$) para identificar los cambios en el verdor de esta especie. Esta condición puede estar relacionada con la falta de factores de corrección atmosférica y de reflectancia del suelo que consideran algunos índices como el EVI o el uso de otras bandas como el caso del NEFVI (Figura IV.7a). La caracterización de la floración de *Pinus hartwegii* con ambos índices arrojó resultados similares presentando una correlación negativa entre ambos valores. Por su parte, el coeficiente de determinación (R^2) utilizando el NDVI fue de 0.5006 ($RMSE = 0.0299$); mientras que al comparar la floración observada en campo con el NEFVI el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.5725 ($RMSE = 0.0208$). A pesar de ser mínima la diferencia, estos resultados denotaron que el uso de NEFVI funciona de mejor manera para representar la floración de *Pinus hartwegii* (Figura IV.7b). Respecto a la fase de desarrollo del fruto, los modelos de regresión indicaron baja correspondencia entre ambos índices y esta fenofase; sin embargo, el NDVI mostró mejores resultados para caracterizar esta fase fenológica ($R^2 = 0.4134$ y $RMSE = 0.0324$; Figura IV.7c). Finalmente, el NDVI caracterizó de mejor manera la fase de maduración de los frutos y semillas ($R^2 = 0.6062$ y $RMSE = 0.0266$), al comparar con los resultados obtenidos con el NEFVI ($R^2 = 0.2271$ y $RMSE = 0.0279$). Ambos índices exhibieron una correlación negativa para representar la maduración de frutos y semillas de *Pinus hartwegii* con base en lo observado en campo (Figura IV.7d).

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

a) Desarrollo de hojas



b) Floración

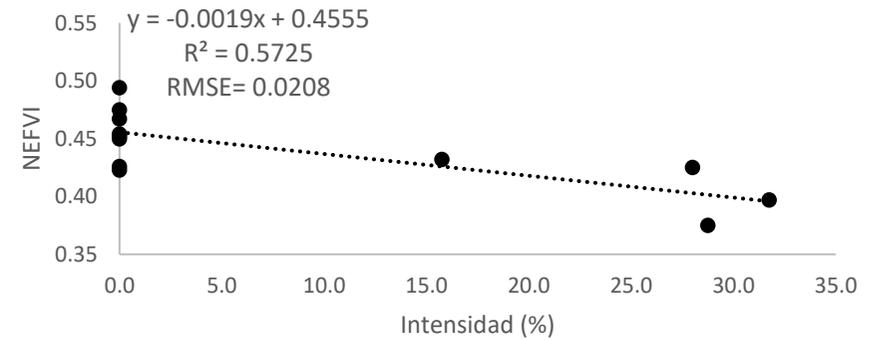
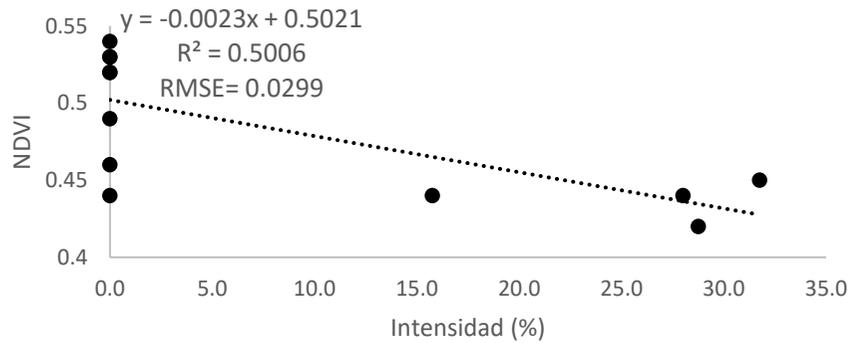
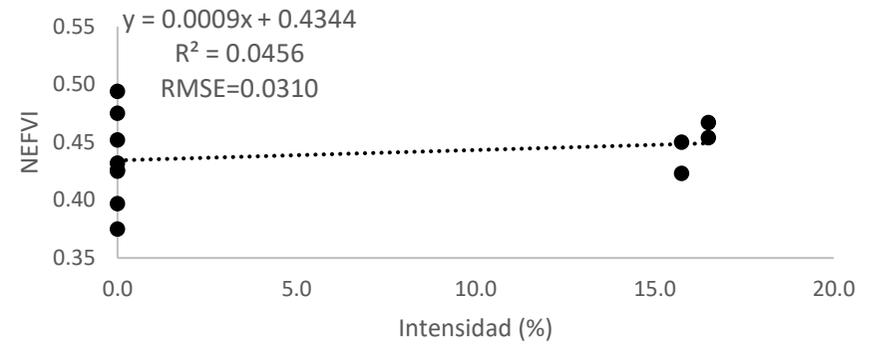
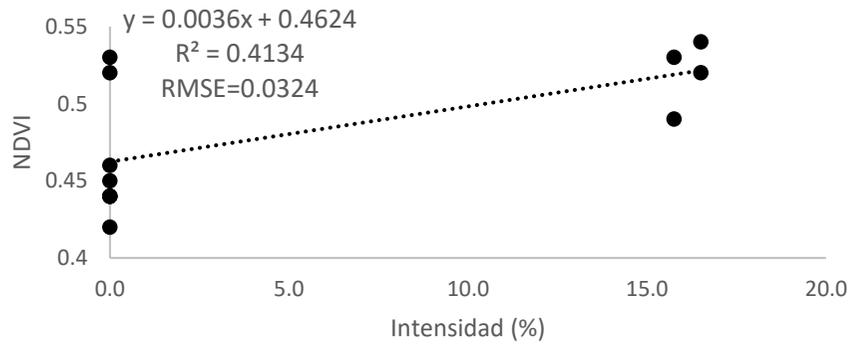


Figura IV.8 Comparación de la fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de *Pinus hartwegii* en el APFFNT

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

c) Desarrollo del fruto



d) Maduración de frutos y semillas

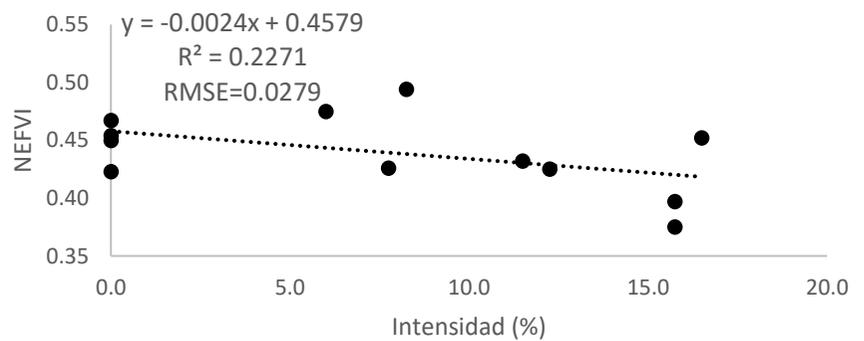
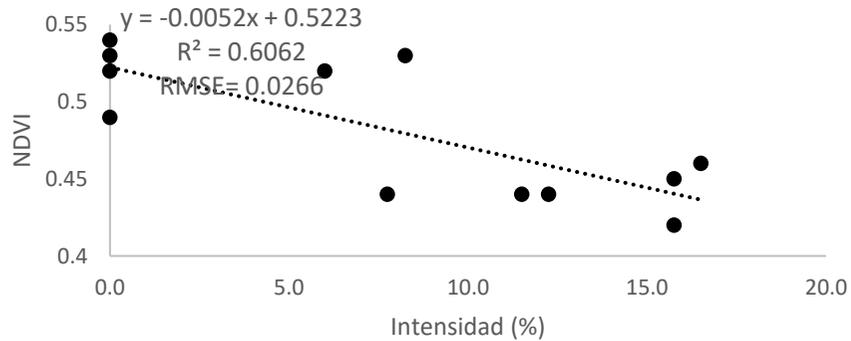


Figura IV.9 comparación de la fenología observada in situ y la generada por medio de índices de vegetación en poblaciones de *Pinus hartwegii* en el APFFNT

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Discusión

Se sabe que el cambio climático tendrá repercusiones en los ecosistemas forestales y especies que habitan en ellos. En el caso de México, la mayoría de los estudios se han enfocado en evaluar la distribución actual y futura de *Pinus hartwegii* (Manzanilla *et al.* 2019) o sus variaciones morfométricas (Iglesias *et al.* 2006) bajo escenarios de cambio climático. Actualmente, se han reportado cambios en la distribución altitudinal del límite arbóreo en bosques templados del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, el Nevado de Toluca, Cofre de Perote y Monte Tlaloc. Estos cambios responden a las variaciones en la temperatura en estos sitios (Alfaro *et al.* 2017; Astudillo *et al.* 2017; Alfaro *et al.* 2020; Andrade *et al.* 2021). Sin embargo, la respuesta fenológica de esta y otras especies mediante el análisis de datos en campo y de percepción remota no ha sido evaluada para esta especie ni para México. El mayor acercamiento al estudio de la fenología de esta especie se ha enfocado en el análisis de indicadores reproductivos y su relación con variables climáticas (Andrade *et al.* 2021). Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un monitoreo transescalar para identificar el comportamiento fenológico de esta especie ante cambios en las condiciones climáticas, pues se ha demostrado que las variaciones en la temperatura han repercutido en los patrones fenológicos, sobre todo de primavera. Sin embargo, el estudio realizado por Correa *et al.* (2021) demostró que en los bosques templados del Cinturón Volcánico Transmexicano, donde *Pinus hartwegii* se caracteriza por ser la especie dominante no se detectaron atrasos o adelantos en las fenofases de primavera u otoño. Los resultados derivados del análisis transescalar en este estudio permitirán utilizar índices del verdor de la vegetación como el NEFVI para caracterizar el ciclo fenológico de esta especie en otras regiones de México donde se distribuye. Por lo anterior, resulta importante disponer de una base mayor de datos

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

fenológicos *in situ* y compararlos con datos de percepción remota, lo que ayudará a mejorar nuestro entendimiento sobre posibles modificaciones en los ciclos fenológicos de esta y otras especies de bosques templados.

Respecto a la fenología de *Pinus hartwegii* observada *in situ*, la presencia de conos masculinos se observó en los meses de enero a abril. Estos resultados coinciden con los reportados por Cortés *et al.* (2011) quienes reportaron la floración de otras especies como *Pinus pseudostrobus* y *Pinus leiophylla* en bosques templados de Michoacán durante los meses de enero a mayo. Por otro lado, los conos o estróbilos femeninos verdes fueron registrados en los meses de septiembre a diciembre, madurando en los meses siguientes (de enero a agosto). La maduración de frutos y semillas fue variable en cada uno de los individuos monitoreados; tanto en el número de árboles que presentó esta fenofase, como en la intensidad de esta en cada uno de ellos. Después de su maduración, los estróbilos femeninos estuvieron presentes durante casi todos los meses de monitoreo. La información fenológica colectada en campo permite describir el estado reproductivo de una especie y cómo este puede ser influenciado por las variables ambientales (Andrade *et al.* 2021).

Actualmente el interés por estudiar la fenología de otoño ha ido en aumento. Un número mayor de estudios se han enfocado en caracterizar la fenología de las especies en esta estación del año. Sin embargo, recopilar datos de las fenofases presentes en esta temporada, estudiarlos e interpretarlos sigue siendo más complicado que las de primavera (Berra y Gaultón, 2021). En el caso de las coníferas como *Pinus hartwegii* identificar la fenología de otoño es un reto, pues se encontró que en esta temporada los individuos monitoreados

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

únicamente disminuyeron su actividad, al no observarse el desarrollo de estructuras durante esta época del año.

En cuanto a los valores máximos y mínimos de los IV obtenidos y la fase de desarrollo de hojas monitoreada en campo, se encontraron mayores coincidencias con los valores más bajos de NEFEVI y la fenología obtenida *in situ*. Por otro lado, los valores máximos de IV no tuvieron correspondencia con los mayores porcentajes de intensidad de desarrollo de hojas. En el caso del NEFVI los valores más altos se desfasaron un mes con respecto al mes de junio en el cual se observaron las intensidades mayores en la fenofase de desarrollo de hojas. De acuerdo con Berra y Gaulton (2021) demostraron que el uso de la percepción remota para detectar la fecha de ocurrencia de los eventos fenológicos en comparación con los datos observados en campo varía al menos media semana para los eventos de primavera y de una semana para los de otoño.

Respecto al análisis transeccalar los modelos de regresión lineal demostraron que el uso del NEFVI caracterizó con precisión el ciclo fenológico de las poblaciones de *Pinus hartwegii*. En el caso del NDVI, a pesar de ser uno de los índices de vegetación más utilizados para caracterizar la fenología de los ecosistemas mexicanos, mostró resultados poco satisfactorios para detectar los cambios en el verdor de la especie. Esta condición puede estar relacionada con la falta de factores de corrección atmosféricos como en el caso del EVI y de reflectancia del suelo. Por lo que los resultados obtenidos en esta investigación apoyan lo dicho por Reed *et al.* (2009) al mencionar que el NDVI no muestra sensibilidad a las variaciones del dosel a lo largo del año.

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

Gracias al avance de la tecnología satelital y al uso de herramientas emergentes como las cámaras digitales o “Phenocams”, se ha logrado una sinergia de múltiples medios para el monitoreo de la fenología forestal. A pesar de las ventajas de estas herramientas, las observaciones tradicionales en superficie seguirán siendo importantes para registrar con precisión el momento en que se presentan las fases fenológicas específicas de las especies. Esta información recabada *in situ* es necesaria para validar y calibrar las mediciones de la fenología generada por medio de imágenes satelitales (Berra y Gaultón, 2021).

Conclusiones

Posiblemente el uso de múltiples herramientas o sensores y escalas de análisis forme parte de las metodologías futuras que permitan cuantificar, caracterizar y comprender de mejor manera, la respuesta fenológica de la vegetación de los bosques templados y ecosistemas en general. Lo anterior responde a necesidad de aprovechar el incremento en las técnicas, herramientas y métodos disponibles para observar la fenología (Berra y Gaulton, 2021).

El uso de índices de vegetación como el NDVI es de los mayormente utilizados a escala mundial. El caso de México no es la excepción y ha sido utilizado para caracterizar el ciclo fenológico de los ecosistemas de bosque templado. En este estudio se demostró que este IV arrojó resultados poco satisfactorios. Sin embargo, su uso no había sido cuestionado anteriormente en México y se continúa usando para identificar la respuesta fenológica de este tipo de ecosistemas. Lo anterior, denota la necesidad de validar la fenología derivada de imágenes satelitales con el fin de identificar si la respuesta de la vegetación es similar a lo observado directamente en superficie. Sin embargo, aún existen retos para realizar este tipo de comparaciones entre ambos conjuntos de datos. Estos retos están relacionados con las

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

diferentes escalas de estudio y, por lo tanto, en la forma igualar los datos obtenidos en campo y hacerlos similares a aquellos de percepción remota. Finalmente, la representatividad de los datos en superficie para llevar a cabo dichas validaciones es otros de los retos a enfrentar. Por otro lado, la generación y uso de nuevos índices de vegetación que permitan caracterizar con precisión el ciclo fenológico de las especies perennes de los bosques templados de México es necesario. Este tipo de índices favorecerá la generación de información fenológica frente a la escasez y dificultad para generar información *in situ* a grandes escalas espaciales y temporales.

Referencias

- Alfaro F, Arredondo T, Pérez M, Endara R (2017). *Pinus hartwegii* Lindl. treeline ecotone: structure and altitudinal limits at Nevado de Toluca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 261-273. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- Alfaro F, Ramírez J, Vargas J, Franco S, Perez M (2020) Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE* 15(2): e0229178. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229178>
- Andrade K, Ramírez C, López J, Jiménez M, Lobato R (2021) Indicadores reproductivos en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(2): 183-189
- Astudillo-Sánchez, C.C., J. Villanueva-Díaz, A.R. Endara-Agramont, G.E. Nava-Bernal, M.A. Gómez-Albores. 2017. Influencia climática en el reclutamiento de *Pinus hartwegii* Lindl. del ecotono en Monte Tlaloc, México. *Agrociencia* 51: 105-118.
- Baumann M, Ozdogan M, Richardson A, Radeloff V (2017). Phenology from Landsat when data is scarce: Using MODIS and dynamic time-warping to combine multi-year Landsat imagery to derive annual phenology curves. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 54: 72-83.
- Berra E y Gaulton R (2021) Remote sensing of temperate and boreal forest phenology: A review of progress, challenges and opportunities in the intercomparison of in-situ and satellite phenological metrics. *Forest Ecology and Management* 480(2021): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118663>

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

- Borrás J, Delegido J, Pezzola A, Pereira M, Morassi G, Camps G (2017) Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de teledetección*.48: 55-66
- Calderón de Rzedowski G. y Rzedowski, J. (2005). Flora fanerogámica del Valle de México. Michoacán, México: INECOL-CONABIO.
- Celemín J (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*. 18(1): 1-17
- Cepeda R y Velázquez G (2005) Análisis de asociación espacial en variables de calidad de vida en Tandil. En: García M (comp.) *Ciudades intermedias. Problemas de su estructura y funciones. Conflictos ambientales y sociales en los años 2000*. Tandil: CIG-REUN, 2005, pp. 53-59.
- Choi J, Kang S, Choi G, Nishda K, Motohka T, Lim J (2011). Monitoring canopy phenology in a deciduous broadleaf forest using the Phenological Eyes Network (PEN). *Journal of Ecology and field biology*. 34(2): 149-156, <https://doi.org/10.5141/JEFB.2011.017>
- Colditz R, López G, Maeda P, Cruz I, Ressler R (2009) Phenology and phenological variability of Mexican ecosystems. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/1038-1041>. 10.1109/IGARSS.2009.5417567
- CONAE (2017) Guía única de productos SPOT [En línea], disponible en: https://catalogos4.conae.gov.ar/spot6/Docs/Guia_Unica_UsuariosSPOTV1.0.pdf [Accesado el 04 de agosto de 2021]
- CONANP (2016). “Programa de manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca” [En línea], Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 01 de junio de 2020 de [https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2017/PM%20Nevado%20de%20Toluca%20-\(web\).pdf](https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2017/PM%20Nevado%20de%20Toluca%20-(web).pdf)
- CONANP (2022) Áreas Naturales Protegidas [En línea], disponible en: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm [Accesado el 28 de enero de 2022]
- Congedo L (2021) Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*. 6(64): 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Coops N, Hilker T, Bater Ch, Wulder M, Nielsens C, Mid G, Stenhouse G (2012). Linking ground-based to satellite-derived phenological metrics in support of habitat assessment. *Remote sensing letters*. 3(3): 191-200, <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.550330>
- Correa A, Romero M, Villanueva J (2021) The greening effect characterized by the Normalized Difference Vegetation Index was not coupled with phenological trends and tree growth rates in eight protected mountains of central Mexico. *Forest Ecology and Management* 496(2021): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119402>

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

- Cortés J, Cornejo G, Ibarra G (2011) Fenología reproductiva de las especies arbóreas de un bosque neotropical. *Interciencia*. 36(8): 608-613.
- D'Odorico P, Gonsamo A, Gough Ch, Bohrer G, Morison J, Wilkinson M, Hanson P, Gianelle D, Fuentes J, Buchmann N (2015). The match and mismatch between photosynthesis and land surface phenology of deciduous forest. *Agricultural and forest meteorology*. 214-215: 25-38.
- Elmore A, Styliniski C, Pradhan K (2016). Synergistic use of citizen science and remote sensing for continental-scale measurements of forest tree phenology. *Remote Sensing* 8(502): 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs8060502>
- Endara A, Nava F, Espinoza A, Ordoñez J, Nava G, Mallén C (2012) “Extracción de madera en el Parque Nacional Nevado de Toluca”. *Revista Mexicana de ciencias forestales*, 3(11), 81-90.
- European Space Agency (2015) SENTINEL-2 User Handbook [En línea]. Disponible en https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/asset_publisher/xsl4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook [Accesado el 8 de febrero de 2022]
- European Space Agency (2022a) SPOT 7 [En línea], disponible en: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot-7> [Accesado el 04 de agosto de 2022]
- European Space Agency (2022b) SPOT 6 and 7 ESA archive [En línea], disponible en: <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/spot-6-and-7-esa-archive> [Accesado el 04 de agosto de 2022]
- Ganguly S, Friedl M, Zhang X, Verma M (2010). Land surface phenology from Modis: Characterization of the collection 5 global land dynamics product. *Remote sensing of environment*. 114: 1805-1816, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.005>
- Hassan Q y Rahman M (2013). Remote sensing-based determination of understory grass greening stage over boreal forest. *Journal of applied remote sensing*. 7(2013): 1-11
- Hmimina G, Dufrene E, Pontailier Y, Delpierre N, Aubinet M, Caquet B, de Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Granier A, Gross P, Heinesch B, Longdoz B, Moureaux C, Ourcival J-M, Rambal S, Saint L, Soudani K (2013). Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote sensing of environment*. 132: 145-158.
- Huete A, Solano R, Gleen E, Restrepo N (2011) Monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos con índices de vegetación MODIS en Francois, J. (Coord.) *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México, D.F. Pp. 195-229
- Iglesias L y Tivo Y (2006) Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable* 2(2): 449-468

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

- Kosmala M, Crall A, Cheng R, Hufkens K, Henderson S, Richardson A (2016). Season spotter: using citizen science to validate and scale plant phenology from near-surface remote sensing. *Remote Sensing* 8(726): 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs8090726>
- León L (2019) Análisis de la distribución espacial de *arceuthobium globosum* implementando teledetección en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Pp. 172
- Liang L, Schwartz M (2009) Landscape phenology: An integrative approach to seasonal vegetation dynamics. *Landsc Ecol* 24(2009): 465-472. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9328-x>
- Liang L, Schwartz M, Fei S (2011). Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote sensing of environment*. 115: 143-157, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.013>
- Liu L, Liang L, Schwartz M, Donnelly A, Wang Z, Schaaf C, Liu L (2015). Evaluating the potential of MODIS satellite data to track temporal dynamic of autumn phenology in a temperate mixed forest. *Remote sensing of environment*. 160: 156-165.
- Maignan F, Bréon F-M, Bacour C, Demarty J, Poirson A (2008). Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements. Comparison with in situ data and applications. *Remote sensing of environment*. 112: 496-505, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.011>
- Manzanilla U, Aguirre O, Jiménez J, Treviño E, Yerena J (2019) Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques* 25(2): 1-16. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>
- Ogunbadewa E, Armitage R, Danson R (2014). Optical medium spatial resolution satellite constellation data for monitoring woodland in the UK. *Forest* 5: 1798-1814. <https://doi.org/10.3390/f5071798>
- Perry J (1991). The pines of Mexico and Central America. Portland, USA: Timber Press. Pp. 231
- Rouse J, Haas R, Schell J, Deering D (1974) Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1. Symposium, Greenbelt NASA
- Rzedowski J (1978) Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Editorial Limusa, Primera edición, México. Pp. 504.
- Soundani K, Hmimina G, Delpierre N, Pontailier J, Aubinet M, Bonal D, Caquet B, de Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Guyon D, Granier A, Gross P, Heinesh B, Longdoz B, Loustau D, Moureaux C, Ourcival J-M, Rambal S, Saint André L, Dufréne E (2012). Ground-based network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes.

CAPÍTULO IV. MONITOREO FENOLÓGICO TRANSESCALAR

- Remote sensing of environment.* 123: 234-245, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.012>
- Sugiura K, Nagai S, Nakai T, Suzuki R (2013). Application of time-lapse digital imagery for ground-truth verification of satellite indices in the boreal forest of Alaska. *Polar science.* 7: 149-161.
- Toscana A y Granados R (2015). Recategorización del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Revista Política y Cultura*, 44, 79-105.
- USA-Nationa Phenology Network (2013) USA National Phenology Network Plant and Animal Observation Handbook. USA---NPN Education & Engagement Series [En línea]. Disponible en www.usanpn.org. [Accesado el 12 de noviembre de 2021]
- USA-Nationa Phenology Network (2019) Conifers (needle bundles). Plant Phenophase Datasheet
- Vilalta C (2005) Cómo enseñar autocorrelación espacial. *Economía, Sociedad y Territorio*, v(18): 323-333.
- Viveros H, Sáenz C, Vargas J, López J, Ramírez G, Santacruz A (2009) Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257(2009): 836-842. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>
- White M, de Beurs K, Didan K, Inouye D, Richardson A, Jensen O, Keefe J, Zhang G, Nemani R, van Leeuwen W, Brown J, de Wit A, Schaepman M, Lin X, Dettinger M, Bailey A, Kimball J, Schwartz M, Baldocchi D, Lee J, Lauenroth W (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology* 15: 2335-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>

DISCUSIÓN GENERAL

La respuesta fenológica de la vegetación es sensible a las pequeñas variaciones del clima. Debido a que las plantas permanecen relativamente estáticas en el espacio, su fenología es fácil de observar y registrar en comparación con la fenología de las especies animales. Esta característica ha favorecido contar con observaciones recurrentes de algunas especies a lo largo del tiempo (Liang *et al.* 2011).

En los últimos años se han presentado cambios en el clima que han impactado en el comportamiento fenológico de las especies (Noormets, 2009). Debido a estos cambios ha sido necesario comprender la respuesta de los seres vivos a las variaciones en el sistema climático. El monitoreo de la fenología de plantas y animales ha permitido recabar datos para analizar su respuesta ante estas modificaciones en el clima. Diversas técnicas y métodos se han desarrollado para comprender los efectos del cambio y variabilidad climática en la biodiversidad. La ciencia ciudadana ha sido una de las principales formas de recabar datos para conocer el comportamiento fenológico de los seres vivos. Sin embargo, debido a los avances en la tecnología se ha recurrido al uso de otras herramientas como las imágenes de satélite y cámaras digitales de repetición o “Phenocams”. Estas herramientas han ayudado al estudio de la fenología y contribuyen a este campo del conocimiento (Noormets, 2009). Cada uno de estos métodos de monitoreo proporciona información en diferentes escalas espaciales y temporales. Sin embargo, estos datos son complementarios y han mejorado nuestro entendimiento sobre la respuesta de los ecosistemas al cambio climático. Este trabajo reveló que, las observaciones realizadas en campo proporcionan información relevante sobre el comportamiento de la vegetación al ser relacionadas con variables climáticas. Sin embargo, al ser limitados los registros en escalas temporales y espaciales es necesario contar con más

información para identificar con mejor precisión los efectos de los cambios en el clima a futuro; como el impacto de las tendencias positivas de la temperatura en la RBMM sobre las poblaciones de *Alnus acuminata*. También se demostró que, ante la ausencia de datos en superficie es posible recurrir al análisis de imágenes satelitales para caracterizar con precisión los ciclos fenológicos de las especies de bosque templado del centro de México. Al demostrar que la percepción remota arrojó resultados favorables, es posible utilizar estos datos con mayor confianza para analizar los efectos del cambio climático en los ciclos fenológicos de la vegetación presente en estos ecosistemas.

La presente discusión intenta involucrar los principales hallazgos de este trabajo de investigación. Se abordan cuatro grandes temas comenzando con una perspectiva general de la fenología de los bosques templados del mundo y de las condiciones fenológicas particulares de las ANP objeto de estudio de esta tesis. A continuación, se abordaron las observaciones fenológicas *in situ*; sus limitantes y las formas de obtener este tipo de información. La siguiente sección denominada Land Surface Phenology, intentó describir los principales índices de vegetación utilizados para caracterizar la fenología de la vegetación por medio de percepción remota y se comparan los resultados obtenidos en este trabajo al utilizar el NDVI y NEFVI para obtener la fenología de *Pinus harwegii* en el APFFNT. Finalmente, la sección de Monitoreo Fenológico Transescalar abordó la necesidad de llevar a cabo este tipo de análisis para validar los datos generados por medio de imágenes satelitales, ante la gran variedad de IV que se han desarrollado alrededor del mundo.

La fenología de los bosques templados

La fenología de la vegetación está principalmente modulada por la humedad del suelo y las condiciones climáticas del sitio (Zhang *et al.* 2001). A pesar de que los ecosistemas forestales son sensibles a las variaciones interanuales de la temperatura (Elmore *et al.* 2016), algunos bosques templados (entre ellos los del Centro de México) presentan una estacionalidad poco marcada en comparación con otro tipo de ecosistemas, principalmente caducifolios. Los cambios de color o la caída de las hojas son características ausentes en la vegetación perene; por lo que, sus cambios fenológicos son menos evidentes. Esta característica se debe a que algunas de las especies presentes en estos ecosistemas de clima templado principalmente coníferas mantienen sus hojas a lo largo del año, por lo que el desarrollo de nuevas hojas representa apenas una pequeña parte del dosel. Debido a su naturaleza perene los estudios fenológicos de los bosques templados son limitados. La mayoría de los trabajos se han concentrado en especies de bosques caducifolios con características de fácil registro, interpretación y comparación con datos obtenidos por medio de percepción remota (Delbart *et al.* 2008; Balzarolo *et al.* 2016; Cuba *et al.* 2018). Lo anterior es resultado de la relativa “facilidad” para identificar y caracterizar los cambios fenológicos en las especies que cambian el color de sus hojas y/o se deshacen de ellas al final de la estación de crecimiento. A pesar de estas características, los cambios fenológicos que ocurren en otoño no han sido completamente documentados y estudiados como los cambios que ocurren en primavera (Richardson *et al.* 2013).

Los bosques templados de coníferas y aquellos de latifoliadas caducifolios presentan comportamientos fenológicos contrastantes. En estos ecosistemas coexisten especies de árboles que desarrollan sus hojas en diferentes momentos del año, pues los eventos fenológicos, la fecha en que se presentan y su duración varía entre especies, incluso entre

individuos de la misma especie (Richardson y O'Keefe, 2009). Cada uno de ellos presenta distintos ciclos de crecimiento y capacidad fotosintética. Sin embargo, comparten una característica pues ambos inhiben su crecimiento ante la presencia de bajas temperaturas (Barr *et al.* 2009). En este estudio se observaron, monitorearon y registraron especies principalmente pertenecientes al género *Pinus* y *Alnus*. Un total de 30 individuos de *Pinus hartwegii* o “pino de las alturas” y 10 individuos de *Alnus acuminata* fueron monitoreados a lo largo de un año en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca respectivamente. En el caso particular de *Pinus hartwegii* se observó que el desarrollo de los estróbilos masculinos ocurrió con anterioridad al desarrollo de nuevas hojas. El desarrollo de los estróbilos o conos femeninos se presentó después del desarrollo de las hojas. Es necesario precisar que, al presentarse una nueva fase esta se sincronizó con la parte final de la fase fenológica que le antecedió. Los meses en los que se observaron estas fases fenológicas en el APFFNT coincidieron con lo reportado por García (2013) al mencionar que la floración en esta especie en el Estado de México, Ciudad de México y Puebla abarca los meses de marzo y abril; mientras que, los conos femeninos se desarrollan en invierno y maduran de octubre a enero. Finalmente, se observó que la actividad de *Pinus hartwegii* disminuyó en los meses previos a los de invierno al no observarse ningún cambio perceptible en la formación de nuevas estructuras. Lo anterior puede explicarse debido a los descensos en las temperaturas como lo mencionaron Barr y colaboradores (2009). Durante el mes de enero los individuos presentaron nuevamente cambios morfológicos al registrarse el desarrollo de estructuras reproductivas como los estróbilos masculinos. El inicio de esta fase fenológica podría estar relacionado con la acumulación de los grados día necesarios para su desarrollo. De acuerdo con Montero *et al.* (2004) la

fenología del ciclo vegetativo y reproductivo de algunas especies del género *Pinus* está determinado por la temperatura del lugar. Esta variable condiciona el momento de la brotación, las tasas de crecimiento y la fecha de la floración. Sin embargo, estudios más exhaustivos son necesarios para corroborar esta afirmación. Por otro lado, el comportamiento fenológico de los 30 individuos registrados fue variable respecto a la intensidad, la fecha de inicio y fin de cada fenofase. A pesar de que se observaron en todos los individuos las mismas fases fenológicas durante las visitas a campo, se registraron diferencias en la intensidad desde 5% y hasta 15% entre los árboles. Otro evento clave a rescatar fue que, de los 30 individuos monitoreados, dos de ellos presentaron conos masculinos en el mes de junio de 2018, cuando los individuos restantes se encontraban en la fase de desarrollo de nuevas hojas. Este comportamiento podría explicarse debido a las diferencias altitudinales de los sitios de monitoreo. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para corroborar dicha afirmación. La presencia de conos masculinos en solo dos de los 30 individuos monitoreados refuerza lo dicho por Richardson y O'Keefe, (2009) al mencionar que los eventos fenológicos varían incluso entre individuos de la misma especie. En el caso de *Alnus acuminata* presentó desarrollo de hojas nuevas a lo largo del año de observación, con un máximo en primavera-verano. Sin embargo, en países como Colombia *Alnus acuminata* es reportada como una especie caducifolia, perdiendo sus hojas en la temporada de secas o bajas temperaturas (Sánchez *et al.* 2009).

Ante estas variaciones en los ciclos fenológicos de la vegetación a nivel de ecosistemas o de individuos es necesario mejorar los esfuerzos de monitoreo para comprender de mejor manera su respuesta a los distintos elementos del entorno y principalmente a las variables climáticas. Contar con mediciones precisas de la dinámica de la vegetación es necesario para

comprender la variabilidad interanual de los ecosistemas y las interacciones clima-biosfera (Zhang *et al.* 2003). Ante el panorama actual de cambio climático, se espera que los bosques templados sean de los ecosistemas más afectados por este fenómeno (Magaña y Gay, 2002). Estas afectaciones o cambios pueden ser detectados por medio de un sistema de monitoreo de su fenología. Identificar atrasos, adelantos o asincronías en las fechas de aparición de las fases fenológicas proporciona información útil para analizar los efectos del cambio climático en los ecosistemas de bosque templado. El análisis de la información fenológica recabada a través del monitoreo a largo plazo permite generar modelos que provean un mayor entendimiento de los procesos fenológicos. Esta comprensión permitirá mejorar nuestra respuesta ante los efectos adversos en los ecosistemas; por ejemplo, al identificar las variaciones fenológicas de las especies presentes en los bosques de la RBMM ante las tendencias positivas de la temperatura y negativas de la precipitación. Cabe destacar que los bosques templados a nivel mundial ocupan el 16% de la superficie del planeta (FAO, 2021). Estos ecosistemas comparten el territorio con una diversidad de comunidades humanas que también se verán afectadas por los efectos del cambio climático en la vegetación. La detección de los cambios fenológicos puede ayudar a las comunidades humanas a generar estrategias de adaptación para la conservación de los ecosistemas de bosque templado en los que habitan y que además les suministran de bienes y servicios.

A pesar de conocerse la relevancia del monitoreo de la fenología para el conocimiento y comprensión de las variaciones fenológicas en los ecosistemas esta actividad aún es limitada en México. En nuestro país los ecosistemas de bosque templado se distribuyen principalmente en las zonas montañosas. Estas corresponden a la Sierra Madre Oriental y Occidental, así como a las Sierra del sur y de Chiapas. Debido a su amplia distribución el

monitoreo fenológico *in situ* se ha enfocado en especies y sitios particulares. La mayoría de estos estudios corresponden a investigaciones científicas o trabajos de tesis de corto plazo enfocados en su mayoría a identificar los efectos del cambio climático en la vegetación presente en estos ecosistemas (Iglesias y Tivo, 2006; García, 2013; Astudillo, 2016; Sáenz *et al.* 2020; Pérez *et al.* 2021). Ante la falta de esfuerzos para llevar a cabo un monitoreo fenológico en los bosques templados, se ha recurrido al uso de otras alternativas como las imágenes de satélite (Gómez, 2007; Colditz *et al.* 2009; Huete *et al.* 2011; Arriola, 2014; Galicia *et al.* 2014). Estas herramientas han aportado valiosa información para comprender la dinámica estacional de este tipo de bosques. A pesar de proveer información de gran importancia estos datos no han sido validados o comparados con información de superficie dada la falta de esta. Por otro lado, la implementación de cámaras digitales de repetición para el monitoreo de estos ecosistemas ha sido un área poco explorada en nuestro país. Este tipo de herramientas de monitoreo se han implementado para analizar la producción primaria bruta y la senescencia del follaje en matorrales mediterráneos caducifolios en el Valle de Guadalupe, en el estado de Baja California (Cueva, 2017; Cueva *et al.* 2021).

Durante la realización de este trabajo se identificaron las ventajas de las llamadas Phenocams para el monitoreo fenológico de los ecosistemas. Un monitoreo combinando imágenes satelitales, observaciones en superficie y cámaras digitales se espera poner en práctica en los sitios de estudio de este trabajo por parte del Colegio de Geografía, de la Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Esta combinación de técnicas y herramientas permitirá conocer con mayor precisión la dinámica fenológica de los ecosistemas perenes de bosque templado, así como complementar la falta de datos en distintas escalas espaciales y temporales.

La observación fenológica *in situ*

La observación de los fenómenos naturales que ocurren a nuestro alrededor ha despertado el interés de los científicos para estudiar sus causas. La observación de los cambios en el ciclo de vida de las especies o su fenología no ha sido la excepción. Esta observación ha dado pie a la conformación de redes de voluntarios o también llamados “científicos ciudadanos”. Un científico ciudadano es una persona que de manera voluntaria colecta datos para contribuir al conocimiento científico (Silvertown, 2009). Existen países como Japón con una amplia historia en la observación fenológica por medio de ciencia ciudadana. En ese país, los datos sobre el seguimiento de la floración de los árboles de cerezo datan del siglo IX (Richardson *et al.* 2013). Este tipo de información ha sido hasta ahora una de las principales fuentes para la obtención de datos fenológicos. Sin embargo, a pesar de su relativa facilidad se deben establecer protocolos de observación estandarizados a fin de obtener datos con la mayor calidad posible o ser validados de alguna manera (Silvertown, 2009). Es importante destacar que el levantamiento de datos fenológicos por este medio requiere de un gran esfuerzo de trabajo en campo para poder coleccionar información de diversas especies y sitios (Szulkin *et al.* 2015). A pesar de que cada vez más personas se unen a estas redes de observación su distribución se ve limitada por la accesibilidad a los sitios de monitoreo, las áreas tan grandes por cubrir o el gran número de especies por monitorear. Lo anterior repercute en el número de sitios de monitoreo en el territorio (Szulkin *et al.* 2015). Ante este tipo de limitantes se ha optado por el uso de otras herramientas que se sumen al trabajo de los observadores voluntarios. En el mundo, las phenocams para el monitoreo de los ecosistemas han tenido un auge en los últimos años, principalmente en países como Estados Unidos, Canadá o algunos países de Europa. Este tipo de herramientas tienen el potencial para seguir la fenología de la vegetación a lo largo del tiempo y complementar a las observaciones por medio de ciencia

ciudadana (Sugiura *et al.* 2013). Las cámaras digitales de repetición pueden ser efectivas como método de verificación de datos en superficie para calibrar índices de vegetación, pero también como una fuente de datos para llenar vacíos en los registros satelitales (Sugiura *et al.* 2013). Las ventajas de las phenocams son su bajo costo, su resistencia al agua y otros factores atmosféricos y la posibilidad de programar los intervalos de tiempo captura de las imágenes. Entre sus desventajas se encuentra la falta de algunas longitudes de onda como el infrarrojo o la falta de movimiento (Sugiura *et al.* 2013). En el caso de México este tipo de herramientas se encuentran presentes en otro tipo de ecosistemas que ya se mencionaron con anterioridad en esta discusión. Sin embargo, los ecosistemas de bosque templado de México no han sido monitoreados utilizando este tipo de herramientas. Se espera que a futuro el uso de las phenocams se extienda en nuestro país para complementar las observaciones en superficie y validar aquellas realizadas por medio de imágenes de satélite.

A pesar de que cada uno de los métodos y herramientas de observación fenológica *in situ* proporciona información distinta, puede ser complementaria. Tanto las phenocams, las torres de flujo y las observaciones por medio de ciencia ciudadana presentan una limitante en común. Esta limitante se relaciona con el área que puede llegar a cubrirse con estos tipos de monitoreo. Generalmente el monitoreo fenológico *in situ*, se caracterizó por enfocarse en áreas muy particulares y por lo tanto en individuos específicos y de pocas especies. Debido a las grandes extensiones que abarcan las ANP objeto de estudio de este trabajo el número máximo de individuos monitoreados fue de 30 correspondientes a la especie *Pinus hartwegii* en el Nevado de Toluca.

Land surface phenology

DISCUSIÓN GENERAL

Se conoce como “Land Surface Phenology” a las mediciones de la fenología de las plantas realizadas por medio de percepción remota (Reed *et al.* 2009). El uso de las imágenes satelitales para estudiar la respuesta fenológica de la vegetación data de mediados de 1980 (Zhang *et al.* 2003). La aplicación de la percepción remota para el monitoreo fenológico ha experimentado un progreso considerable en las últimas dos décadas (Reed *et al.* 2009). Gracias al lanzamiento de los satélites de observación de la Tierra se han generado registros continuos sobre los cambios en la biósfera (Noormets, 2009). El uso de imágenes satelitales ha permitido caracterizar los ciclos de crecimiento de las plantas alrededor del mundo (Zhang *et al.* 2001). A través del análisis de series de tiempo derivadas de imágenes satelitales se han monitoreado a gran escala y de manera efectiva las variaciones, patrones y procesos fenológicos de las comunidades vegetales (Zhang *et al.* 2001; Zhang *et al.* 2003). La cobertura de la superficie terrestre que ofrecen los sensores remotos favorece el monitoreo de la vegetación a escala regional hasta global (Zhang *et al.* 2003). Sin embargo, las bajas resoluciones espaciales y temporales han obstaculizado los análisis de plantas individuales, por lo que los estudios realizados con imágenes de satélite son aplicables para estudiar la fenología de la vegetación a nivel de poblaciones (Szulkin *et al.* 2015). Por ejemplo, algunos satélites cuentan con una buena resolución temporal como es el caso de MODIS (1 o 2 días dependiendo de la latitud); sin embargo, su resolución espacial (250 a 1000 metros dependiendo de la banda espectral) dificulta llevar a cabo estudios fenológicos a nivel de individuos. Otro ejemplo es el de Landsat, que a pesar de contar con una buena resolución espacial (30 metros), su resolución temporal es de 16 días (García y Mas, 2011; Szulkin *et al.* 2015). Sin embargo, existen otros satélites como Sentinel-2, cuya resolución espacial es de 10 metros en las bandas utilizadas en este trabajo (roja, azul, e infrarrojo cercano). A pesar

de estas características no fue posible analizar la fenología a nivel de individuos. Ante esta problemática se decidió calcular la fenología de la población de *Pinus hartwegii* a partir de los datos recolectados en superficie. Lo anterior fue necesario para realizar comparaciones en el mismo nivel de análisis espacial con ambos métodos de monitoreo. Este proceso ha sido aplicado solamente por Liang *et al.* (2011; 2014) para analizar la fenología de un bosque mixto en los Estados Unidos. A pesar de las distintas características de los sensores remotos, la alta resolución espacial de algunas imágenes puede contribuir significativamente al conocimiento de la dinámica fenológica de las especies, incluso cuando los datos en superficie son limitados (Szulkin *et al.* 2015).

Por otro lado, en comparación con los datos colectados de especies o árboles particulares, el uso de imágenes de satélite para el monitoreo fenológico ofrece la posibilidad de estudiar distintos fenómenos biológicos en diferentes escalas (Szulkin *et al.* 2015). Esta información se encuentra concentrada en áreas denominadas píxeles (Reed *et al.* 2009). Esta característica favorece que la fenología analizada sea un promedio de todo aquello que se encuentra dentro de cada una de estas áreas de análisis.

Otra de las ventajas del uso de las imágenes satelitales es la habilidad de los sensores remotos para capturar de manera continua los patrones fenológicos y poder analizarlos en retrospectiva pues estos insumos pueden ser archivados como un conjunto de datos (Reed *et al.* 2009). Por otro lado, el libre acceso a algunas bases de datos de imágenes satelitales ha permitido el estudio de las variaciones fenológicas de la vegetación (Szulkin *et al.* 2015). Gracias a esta característica las imágenes Sentinel-2 utilizadas en este trabajo permitieron analizar el ciclo fenológico de las especies presentes en los sitios de estudio. A pesar de todas sus ventajas, las bases de datos de productos de percepción remota no han sido validados

satisfactoriamente. Lo anterior se debe a la dificultad de obtener datos que cubran grandes extensiones de la superficie terrestre a lo largo de toda la estación de crecimiento (Reed *et al.* 2009). Además, las diferencias en las escalas espaciotemporales de observación dificultan también estos procesos (Liang *et al.* 2011).

Por otra parte, las imágenes satelitales han sido utilizadas para generar parámetros de medición de la fecha de ocurrencia de los eventos biológicos (Reed *et al.* 2009). Un número importante de métodos han sido utilizados para mejorar el conocimiento del desarrollo fenológico de la vegetación, entre ellos el desarrollo de índices de vegetación (Zhang *et al.* 2001). Los índices de vegetación se generan a partir de las diferencias en los valores de reflectancia de la vegetación en distintas longitudes de onda, principalmente en el rojo (0.6-0.7 μ m) e infrarrojo cercano. Incluso utilizan otras bandas para reducir el efecto de los aerosoles atmosféricos, de la superficie del suelo (banda azul) o para destacar el contenido de agua en las hojas (infrarrojo de onda corta; Reed *et al.* 2009). Estos índices de vegetación han demostrado ser eficaces para monitorear la fenología de las plantas (Jin y Eklundh, 2014). Sin embargo, algunos muestran mejores resultados dependiendo de las condiciones particulares del sitio de estudio. Por ejemplo, en condiciones de nieve el Plant Phenology Index (PPI) mostró mejores resultados que el NDVI para caracterizar la fenología de los bosques boreales en Suiza (Jin y Eklundh, 2014). En el caso de este estudio, el NDVI mostró resultados no satisfactorios al comparar el desarrollo de hojas *in situ* con datos percepción remota ($R^2=0.2627$). Resultados más alentadores se observaron al comparar el NEFVI ($R^2=0.7098$) con los datos recabados en campo. En general, los mejores resultados obtenidos con el NEFVI para caracterizar el desarrollo de hojas observado en campo se pueden explicar porque cuando se trabaja con el NDVI es necesario comprender su no linealidad con respecto

a la biomasa del suelo, el área foliar y su saturación en niveles elevados de verdor (Reed *et al.* 2009). Por otro lado, el EVI muestra ser más sensible a las variaciones del dosel en regiones de alta biomasa. Sin embargo, requiere parámetros de corrección para eliminar el ruido causado por los efectos del suelo en condiciones de bajo o moderado verdor y por la presencia de aerosoles atmosféricos (Huete *et al.* 2002). En el caso del NEFVI mostró sensibilidad a las variaciones del dosel a lo largo del año. De este modo, el NEFVI mostró alta efectividad para caracterizar la fenología de áreas predominantes de *Pinus hatwegii* a pesar de que los cambios fenológicos en este tipo de vegetación son menos evidentes en comparación con otro tipo de vegetación caducifolia. Debido a estas características se espera que este nuevo índice de vegetación propuesto en este estudio pueda ser utilizado para caracterizar la fenología de las especies presentes en sitios con características similares a las analizadas aquí.

Monitoreo fenológico transescalar

La combinación de datos fenológicos provenientes de diversas fuentes (por ejemplo, imágenes de satélite y observaciones colectadas por científicos ciudadanos) tiene un gran potencial para utilizarse como indicadores del cambio climático. Sin embargo, la diversidad de escalas de análisis, las diversas fuentes de datos y la periodicidad de monitoreo se convierten en retos a enfrentar para comprender la variación fenológica de la vegetación (Elmore *et al.* 2016). Debido a estas restricciones, es necesario llevar a cabo comparaciones entre observaciones en superficie y por medio de imágenes satelitales para lograr un mejor entendimiento de la fenología de la vegetación terrestre. Este tipo de comparaciones es además necesario para validar las observaciones producto de la percepción remota (Zhang *et al.* 2003). Para llevar a cabo estas comparaciones es necesario contar con datos suficientes

en superficie. Para este fin se han recurrido a la generación de información producto de la ciencia ciudadana o de herramientas como las cámaras digitales. Estos insumos proveen a los científicos un nivel de confianza mayor al contar con datos para validar los resultados generados a partir de imágenes de satélite (Reed *et al.* 2009). Por ejemplo, en zonas con nieve es necesario realizar la verificación de la información derivada de imágenes satelitales por medio de observaciones *in situ* para identificar la relación entre la respuesta de la vegetación y el derretimiento de la nieve (Sugiura *et al.* 2013).

Sin embargo, aún sin una validación se han recurrido al uso de la percepción remota para realizar estudios sobre la fenología de la superficie con resultados alentadores (Reed *et al.* 2009). Este es el caso de México, en donde la fenología de la diversidad de ecosistemas presentes en nuestro país se ha caracterizado utilizando este tipo de herramientas dado el gran avance en la tecnología satelital. Como se demostró en el capítulo 2 de este documento, un solo proyecto de comparación en dos escalas de monitoreo se ha realizado. Sin embargo, este estudio fue enfocado en un ecosistema de bosque tropical seco caducifolio en la Península de Yucatán (Cuba *et al.*, 2018) por lo que los bosques templados no han sido analizados de esta manera. Este trabajo forma parte de uno de los primeros estudios transescalares para el conocimiento de los bosques templados de México. Sin embargo, al no contar con antecedentes de monitoreo en superficie se puede considerar una limitante para llevar a cabo este tipo de análisis en los diferentes ecosistemas de nuestro país. Aun cuando se han recurrido a la percepción remota para el conocimiento de la fenología de la vegetación, es necesario seguir fomentando el monitoreo en superficie a través de ciencia ciudadana o phenocams en territorio mexicano. Estas acciones permitirán contar con datos para validar la información obtenida por medio de percepción remota a futuro (Liang *et al.* 2011). La

información fenológica derivada puede resultar un indicador útil de los efectos del cambio climático en los ecosistemas. Se espera que estos datos puedan ayudar a identificar atrasos o adelantos en las fechas de aparición de fases fenológicas clave. Esta información puede además apoyar a la toma de decisiones por parte de las comunidades humanas y otros actores clave para la gestión, manejo y conservación de los ecosistemas templados y de los servicios ambientales que proveen ante los posibles efectos adversos del cambio climático.

Referencias

- Arriola V (2014) Respuesta de la vegetación a la variabilidad climática y sus implicaciones en la conservación del bosque templado en la Sierra Madre Oriental. Tesis de licenciatura, México, Universidad Nacional Autónoma de México
- Astudillo C (2016) Variabilidad climática y dinámica poblacional del bosque de alta montaña inferidas con anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* en Monte Tlaloc, México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Pp. 93
- Balzarolo M, Vicca S, Nguy A, Bonal D, Elbers J, Fu Y, Grünwald T, Horemans J, Papale J, Suyker A, Veroustraete F (2016) Matching the phenology of Net Ecosystem Exchange and vegetation indices estimated with MODIS and FLUXNET in-situ observations. *Remote Sensing of Environment* 174(2016): 290-300
- Barr A, Black T, McCaughey H (2009) Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in Western Canada. en Noormets A (ed) Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research, pp 3–34. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0026-5>
- Colditz R, López G, Maeda P, Cruz I, Ressler R (2009) Phenology and phenological variability of Mexican ecosystems. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/1038-1041>. 10.1109/IGARSS.2009.5417567
- CONAFOR (2022) *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.) [En línea] Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf> [Accesado el 27 de febrero de 2021]
- Cuba N, Rogan J, Lawrence D, Williams C (2018) Cross-scale correlation between in situ measurements of canopy gap fraction and landsat-derived vegetation indices with implications for monitoring the seasonal phenology in tropical forests using MODIS data. *Remote Sensing* 10(7): 1:21. <https://doi.org/10.3390/rs10070979>
- Cueva A (2017) Biophysical controls of ecosystem fluxes of carbon in a semiarid Mediterranean shrubland. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California. Pp. 96

- Cueva A, Bullock S, Méndez R, López E, Vargas R (2021) Foliage senescence as a key parameter for modeling gross primary productivity in a Mediterranean shrubland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, e2020JG005839. <https://doi.org/10.1029/2020JG005839>
- Delbart N, Picard G, Le Toan T, Kergoat L, Quegan S, Woodward I, Dye D, Fedotova V (2008) Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Glob Chang Biol* 14(2008): 603-614. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01505.x>
- Elmore A, Stylinski C, Pradhan K (2016). Synergistic use of citizen science and remote sensing for continental-scale measurements of forest tree phenology. *Remote Sensing* 8(502): 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs8060502>
- FAO (2021) Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Galicia L, Cuevas M, González L, Couturier S (2014) Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*. (39)6: 368-374
- García M (2013) Patrones de distribución de *Pinus hartwegii*, como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Pp. 116
- García T y Mas J (2011) Presentación del sensor MODIS en Francois, J. (Coord.) *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México, D.F. Pp. 11-24
- Gómez L (2007) Variabilidad climática y cambio de uso de suelo en la Sierra Norte de Oaxaca: implicaciones en los escenarios de cambio climático. Tesis de Doctorado. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2): 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete A, Solano R, Gleen E, Restrepo N (2011) Monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos con índices de vegetación MODIS en Francois, J. (Coord.) *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México, D.F. Pp. 195-229
- Iglesias L y Tivo Y (2006) Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable* 2(2): 449-468
- Jin H, Eklundh L (2014) A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of Environment* 152(2014): 512-525. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010>

- Liang L, Schwartz M, Fei S (2011). Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote sensing of environment*. 115: 143-157, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.013>
- Liang L, Schwartz M, Wang Z, Gao F, Schaaf C, Tan B, Morriset J, Zhang X (2014) A cross comparison of spatiotemporally enhanced springtime phenological measurements from satellites and ground in a northern U.S. mixed forest. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 52(12): 7513-7526. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2313558>
- Magaña V y Gay C (2002) Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta ecológica* octubre-diciembre. [En línea] México. 65: 7-23. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906501.pdf> [Accesado el día 19 de noviembre de 2021].
- Montero G, Martínez F, Alía R, Candela J.A, Ruiz R, Cañelas I, Mutke S, y Calama R. (2004) Generalidades de *Pinus pinea* L. En: Borrero G. (Dir) El pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en Andalucía: Ecología, distribución y silvicultura. Pp. 12-47
- Noormets A (2009) Phenology of Ecosystem Processes. Applications in Global Change Research. Springer. Pp 281
- Pérez M, Ramírez J, Vargas J, Alfaro F (2021) A review of the knowledge of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.): current situation and the need for improved future projections. *Trees*. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02221-9>
- Reed B, Schwartz M, Xiao X (2009) Remote Sensing Phenology: Status and the Way Forward en: Noormets A (ed) Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research, pp 3–34. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0026-5>
- Richardson A y O'Keefe J (2009) Phenological Differences Between Understory and Overstory: A Case Study Using the Long-Term Harvard Forest Records en: Noormets A (ed) Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research, pp 3–34. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0026-5>
- Richardson A, Keenan T, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M (2013) Climate change, phenology, and control of vegetation feedbacks to the climate system. *International Journal of Biometeorology* 169(2015): 156-173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
- Sáenz C, Mendoza E, Gómez E, Blanco A, Endara A, Lindig R, López J, Trejo O, Wehenkel Ch, Cibrián D, Flores C, Plascencia A, Vargas J (2020) Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research* 50: 843–854 (2020) <https://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>

- Silvertown J (2009) A new dawn for citizen science. *Trend in Ecology and Evolution* 24(9): 467-471
- Sugiura K, Nagai S, Nakai T, Suzuki R (2013). Application of time-lapse digital imagery for ground-truth verification of satellite indices in the boreal forest of Alaska. *Polar science*. 7: 149-161
- Szulkin M, Zelazowski P, Marrot P, Charmantier A (2015). Application of high-resolution satellite imagery to characterize individual-based environmental heterogeneity blue tit population. *Remote Sensing* 7: 13319-13336. <https://doi.org/10.3390/rs71013319>
- Zhang X, Friedl M, Schaaf C, Strahler A, Hodges J, Gao F, Reed B, Huete A (2003) Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 84(2003): 471-475
- Zhang X, Hodges J, Schaaf C, Friedl M, Strahler A, Gao F (2001) Global Vegetation Phenology from AVHRR and MODIS Data. *IEEE Xplore*. 2262-2264

CONCLUSIONES

En los últimos años, las aplicaciones de la información fenológica de la vegetación han estado orientadas en identificar los impactos del cambio climático. Ante esta situación, no solamente los ecosistemas se encuentran en riesgo de sufrir daños a causa de este fenómeno, las comunidades locales que los habitan también se encuentran expuestas a los efectos adversos de las variaciones en el clima. Esta situación se ve reflejada en la RBMM, en donde se evidenciaron tendencias positivas en las temperaturas máximas y promedio; así como una tendencia negativa en las precipitaciones. Estas condiciones ponen sobre la mesa la necesidad de identificar las repercusiones de estos cambios en la respuesta fenológica de la vegetación y en las comunidades humanas a través de la provisión de servicios ecosistémicos.

En este trabajo se analizó la fenología de la vegetación de dos áreas naturales protegidas de bosque templado de México, la RBMM y el APFFNT. Se recurrió al uso de la percepción remota y de observaciones *in situ* para recabar datos sobre el comportamiento fenológico de las especies *Pinus hartwegii* y *Alnus acuminata*. No obstante, la aplicación de la información fenológica va más allá de la generación de datos para el conocimiento de las especies objeto de estudio. Los datos generados gracias al monitoreo de *Alnus acuminata* en la RBMM pueden ayudar a las comunidades humanas en la toma de decisiones respecto a la conservación y reproducción de la especie para su aprovechamiento. Además, se destacó la importancia de llevar a cabo el monitoreo de la fenología para otras especies presentes en la RBMM y no solo de aquellas relevantes para una especie en particular como la mariposa monarca. En el caso del APFFNT, se generó información de importancia sobre la fenología de una especie perenne, pues la mayoría de los datos reportados en la literatura pertenecieron a especies caducifolias.

CONCLUSIONES

Se presentó un panorama general sobre el monitoreo transescalar alrededor del mundo y se puso en evidencia que, pocos son los países que han aplicado este tipo de monitoreo para el análisis de la fenología de la vegetación, entre los cuales no destacó México. Se llevó a cabo la aplicación del análisis transescalar para analizar la fenología de los bosques del APFFNT. Dadas las diferencias en las escalas de monitoreo fue necesario realizar este estudio a nivel de poblaciones. Gracias a la alta dominancia de *Pinus hartwegii* en el APFFNT fue posible realizar este procedimiento. Sin embargo, la mayoría de los estudios que se realizan en el mundo no aplican esta metodología y los datos de percepción remota se utilizan de manera directa. Gracias a los resultados de esta investigación se comprobó que el uso de algunos índices de vegetación provee información confiable similar a aquella observada en superficie. En este caso, se puso a prueba la capacidad del NDVI y NEFVI para caracterizar la respuesta fenológica de las especies perenes presentes en los bosques templados de nuestro país y se demostró que el uso del NEFVI propuesto en esta investigación arrojó mejores resultados para la generación de información fenológica sobre el desarrollo de hojas; mientras que el NDVI presentó deficiencias para caracterizar la fenología de especies perennes, a pesar de ser uno de los índices de vegetación más utilizados.

Por otro lado, este trabajo evidenció la necesidad de contar con datos de monitoreo en campo para validar y comparar la información generada por medio de percepción remota. Derivado de esta falta de información *in situ* se encontró que algunos países han recurrido cada vez más al uso de cámaras fenológicas. Estas herramientas han mostrado alta eficacia para analizar la fenología de la vegetación y así complementar la información obtenida en campo. Mientras que los esfuerzos de monitoreo *in situ* -ya sea por medio de ciencia ciudadana o cámaras fenológicas- se replican en el territorio mexicano, este trabajo demostró que es posible generar información confiable a través del uso de imágenes de

CONCLUSIONES

satélite para llenar los vacíos de información y representar con un alto nivel de confiabilidad la fenología de la vegetación. A futuro se espera utilizar la información generada por medio de percepción remota gracias al análisis de series de tiempo para relacionarla con datos climáticos y comprender la respuesta de estos bosques al cambio climático. Estos análisis permitirían identificar cambios en los ciclos de vida de las plantas y en la fecha de llegada de la primavera. Estos cambios ya han sido detectados en algunas regiones de Estados Unidos al identificar adelantos en la fecha de floración de algunas especies.

Finalmente, la hipótesis planteada en esta tesis se acepta parcialmente. Los resultados mostraron que la respuesta fenológica de la vegetación monitoreada con imágenes satelitales arrojó resultados similares en comparación con el comportamiento de la vegetación caracterizado por medio de observaciones en superficie. Sin embargo, estos resultados dependerán del índice de vegetación utilizado, de la cobertura del dosel, del tipo de vegetación a estudiar y de la respuesta fenológica que se desea detectar; en este caso, los mejores resultados se obtuvieron para caracterizar el desarrollo de nuevas hojas.