



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

Dinámica del paisaje vegetal y sus escenarios espacio-temporales: estudio de
caso de la región Purhépecha, México

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

VALERIO CASTRO LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Alejandro Velázquez Montes

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (UNAM)

Morelia, Michoacán, México, febrero de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Contenido

Capítulo I	1
1.1 Introducción	2
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación.....	7
1.4 Diseño de investigación.....	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivo particulares	8
1.4.3 Estructura del documento	9
1.5 Bibliografías.....	9
Capítulo II. Reconstruction of native vegetation based upon integrated landscape approaches	17
2.1 Abstract	18
2.2 Introduction	18
2.3 Methods.....	20
2.3.1 Study area.....	20
2.3.2 Bioclimatic analysis.....	22
2.3.3 Integrating landscape components.....	22
2.3.4 Reconstruction of the vegetation landscape.....	23
2.3.5 Validation of the land cover map.....	24
2.4 Results	25
2.5 Discussion	30
2.6 References	32
Capítulo III. Relación de la lluvia de polen moderno y la vegetación en el centro de México	38
3.1 Resumen.....	39
3.2 Introducción	39
3.3 Materiales y Métodos	41
3.3.1 Área de estudio.....	41
3.3.2 Análisis de polen moderno	42
3.3.3 Índice de Diversidad.....	45
3.3.4 Análisis de la vegetación	46
3.3.5 Análisis multivariado.....	46
3.3.6 Análisis de la relación del polen y la cobertura de vegetación.....	47
3.4 Resultados	47

3.4.1 Análisis de diversidad.....	47
3.4.2 Análisis de lluvia de polen moderno.....	48
3.4.3 Análisis multivariado.....	49
3.4.4 Análisis de relación de la lluvia de polen moderno y su cobertura de vegetación.....	50
3.5 Discusión.....	52
3.5.1 Zona de montañas.....	53
3.5.2 Zona de colinas.....	54
3.5.3 Zona de llanuras	55
3.6 Conclusiones	56
3.7 Bibliografías.....	56
Capítulo IV. Integration of landscape approaches for the spatial reconstruction of the vegetation.....	63
4.1 Abstract	64
4.2 Introduction	64
4.3 Methods.....	66
4.3.1 Study Area.....	66
4.3.2 Bioclimatic Analysis	67
4.3.3 Pollen Rain Analysis	67
4.3.4 Radiocarbon Data and Pollen Diagrams	68
4.3.5 Bioclimatic approach.....	68
4.3.6 Statistical Analysis	69
4.4. Results.....	69
4.7 Discussion	74
4.8 References.....	76
Capítulo V.....	82
5.1 Discusión.....	83
5.2 Conclusiones	86
5.3 Retos a futuro	87
5.4 Bibliografías.....	88

Índice de Figuras

Capítulo II

Figure 2. 1 Study area at the Purepecha region, Mexico (12, 698 km ²) with reference to the main towns.....	21
---	----

Figure 2. 2 Chart of the landscape reconstruction process. The image represents the main phases in each one of the perspectives	25
Figure 2. 3 Map of the current isobioclimates at the Purepecha region, Mexico	26
Figure 2. 4 Distribution of current vegetation cover at the Purepecha region, Mexico	27
Figure 2. 5 Distribution of the main types of vegetation based on the climatic gradient	28
Figure 2. 6 Reconstructed map of the native vegetation patterns at the Purepecha region approximately 150 year ago when current anthropogenic influence was negligible	30

Capítulo III

Figura 3. 1 Ubicación de los sitios de muestreo en el centro de México	42
Figura 3. 2 Diagrama de índices de diversidad de los espectros polínicos.....	48
Figura 3. 3 Diagrama de polen moderno en porcentajes.....	49
Figura 3. 4 Ordenación de la lluvia de polen	50

Capítulo IV

Figure 4. 1 Location of the study area. The figure shows the most important locations	66
Figure 4. 2 Methodological processes for the reconstruction of the vegetal landscape.....	69
Figure 4. 3 Distribution of current thermotypes (temperature gradient)	70
Figure 4. 4 Current distribution ranges of ombrotypes (precipitation gradient).....	71
Figure 4. 5 Organizational chart of pollen taxa in relation to current isobioclimates	72
Figure 4. 6 Diagram of proxies located within the study area	73

Índice de Tablas

Capítulo III

Tabla 3.1 Ubicación geográfica de las muestras de polen moderno	43
Tabla 3. 2. Índices de relación polen-vegetación.....	51

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a mis padres Don Valerio Castro López y Doña Carlota López Aparicio. A ellos, que a lo largo de esta maravillosa vida me han regalado mi educación y porque siempre han confiado en mí en este camino. Por sus valiosos consejos para ser una mejor persona y un excelente profesionista. A ellos, que siempre me enseñaron a trabajar en equipo y salir adelante a pesar de las grandes adversidades que se presenten. A ustedes que fueron culpable de mi único vicio, tomar una taza de café de la región Ñuu Ñama por las mañanas y otra taza por las tardes. ¡Los Amo!

A mi hermosa novia, Mireya Pérez García, que siempre ha estado conmigo a lo largo de estos años. No tengo palabras o una forma para decirte que tan agradecido estoy de ti. Gracias por todos los días maravillosos, por los consejos que siempre son muy acertados y por transmitirme tu bella alegría. ¡Gracias por estar a mi lado!

A mis hermanos Mario Castro López, Hugo Castro López, Estela Castro López, Jesús Castro López (+) y Gisela Castro López. A ustedes que siempre los he admirado y respetado. A ustedes que sobre toda las cosas me han apoyado de una manera incondicional. A ustedes que me han ayudado en los momentos más difíciles de mi vida. ¡Muchas gracias!

Agradecimientos

Me gustaría agradecer infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme un espacio para cumplir la presente disertación doctoral. De la misma manera, también me gustaría agradecer al Centro de Investigación en Geografía Ambiental y a su Director el Dr. Antonio Vieyra Medrano por todo el apoyo, las atenciones, confianza y sobre todo un espacio durante mi estancia doctoral.

Al CONACYT por darme la confianza de realizar esta investigación y por la otorgarme la beca para el doctorado.

A mi director de tesis el Dr. José Alejandro Velázquez Montes por aceptarme en su grandioso equipo de trabajo. Porque en los últimos cuatro años me transmitió los conocimientos, la disciplina y sobre todo la confianza a lo largo del doctorado. Pero sobre todo por ofrecerme su amistad incondicional.

También quisiera agradecer a los miembros del comité tutor; Dr. Gerald Islebe y Dr. Ángel Guadalupe Priego Santander por sus consejos y críticas constructivas en las evaluaciones semestrales. A los miembros del sínodo; Dr. Manuel Mendoza Cantú, Dr. Ángel Guadalupe Priego Santander, Dr. Korand Gajewski, Dra. Gabriela Domínguez Vázquez y Dr. Lorenzo Vázquez Selem por sus atinados comentarios y sugerencias en la redacción de la disertación doctoral. Ellos, son parte importante en mi formación profesional.

Al Dr. Fernando Gopar Merino, Dra. Consuelo Medina, Dr. Orlando Rangel, Maestra Alejandra Larrazábal, Maestra Rocío Aguirre, Bióloga Estefanía Cano y Dra. Gabriela Domínguez Vázquez por su apoyo incondicional en el trabajo técnico, asesorías y trabajo de campo. Sin su ayuda y su amplio conocimiento en esta área la presente disertación no se hubiera logrado.

A mis grandes amigos Fernando Gopar, Neyra Sosa, Consuelo Medina, Estefanía Cano, Cloe Valladares, Nicolás Vargas, América Navarro, Alejandra Lazarrabal, Violeta Rangel, Raquel González, Alfredo Flores, Livier Soto, Ayelt Castro, Guadalupe Castro, Gaby Simón, Miguel Cejas. A todos ellos, por su gran apoyo y por todo el momento de alegrías en este arduo camino.

Capítulo I.

1.1 Introducción

La geografía tiene grandes contribuciones en la construcción de escenarios de los cambios locales y globales. A menudo, los estudios geográficos se han centrado con mayor interés al problema del cambio climático porque tienen fuertes repercusiones hacia los sistemas terrestres. Ejemplos de estos cambios son; los derretimientos de los glaciares, la degradación del permafrost, la impredecible caída de nieve, los cambios en la estructura de los bosques y la migración de los ecosistemas (Slaymaker, 2001). A partir de lo anterior se ha podido entender, evaluar y generar escenarios frente al cambio climático (Slaymaker, 2001; Araújo, Cabeza, Thuiller, Hannah y Williams, 2004; Ackerly et al., 2010). Por ello, el cambio climático es un fenómeno estudiado por la geografía física y humana (Rodima-Taylor, Olwig y Chhetri, 2011; Barrasa-García, 2017). Estos estudios han determinado que el principal desencadenante del cambio climático es el cambio de los usos de suelo (Lambin et al., 2001). La deforestación es una de las principales prácticas en las últimas décadas que contribuyen a los cambios de coberturas de vegetación y usos de suelo (Lambin et al., 2001; Mas, Velázquez y Couturier, 2009). Durante las últimas décadas, la deforestación se ha intensificado por el crecimiento de la población, el desarrollo de la infraestructura, el pastoreo excesivo y la expansión de la agricultura (Lambin et al., 2001; Mas, Velázquez y Couturier, 2009). Estos cambios cobertura vegetal y usos de suelo han llevado a la acumulación de gases de efecto invernadero en la tropósfera incitando a un calentamiento global (Turner II, Meyer y Skole, 1994; Ruddiman, 2003). Tanto la cobertura vegetal como los usos de suelo son atributos del paisaje físico-geográfico, los cuales tienen interacción con otros formadores del paisaje, a saber; el clima, la roca, el relieve, la fauna y la actividad antrópica (Zonneveld, 1990). Es por ello, cada componente de paisaje coevoluciona en el tiempo y en el espacio, lo que significa que lo que observamos en la actualidad es el resultado de años de evolución conjunta entre todos los componentes del mismo (Priego-Santander, Bocco, Mendoza y Garrido, 2008). Por esta razón, las unidades de paisaje proporcionan una base sólida para estudiar las relaciones topológicas y corológicas de la ecología del paisaje, especialmente la geomorfología, el suelo y la vegetación (Zonneveld, 1989). Por tanto, los cambios de coberturas de vegetación y los usos de suelo como punto de partida son indispensables para comprender el cambio climático, especialmente como han sido estas variaciones en diferentes escalas temporales.

Los escenarios de cambio climático, en su mayoría, van orientados a construir modelos futuros para generar estrategias de conservación y asistir a la migración de especies amenazadas (Beniston et al., 2007; Sáenz-Romero et al., 2010). Sin embargo, estos modelos no pueden ser validados de ningún modo, sólo pueden ser validados con el paso del tiempo o, por el contrario, hasta el momento que fueron proyectados. Por el contrario, los escenarios pasados cuentan con una forma de validarlos, con la ayuda de los microfósiles y otros bio-marcadores. La construcción de escenarios pasados proporcionara mayor fortaleza para las predicciones del futuro. Es por ello, que la actividad antrópica en su interés de reconocer la historia de la vegetación ha tomado como base algunos elementos de paisaje para explicar la diversidad de plantas, sus cambios, (Carrillo-Bastos, Islebe y Torrescano-Valle, 2012; Chaput y Gajewski, 2018) la vulnerabilidad, la sensibilidad y la resiliencia de los ecosistemas (Islebe et al., 2016).

Las investigaciones de las condiciones pasadas y las afinidades de la biota moderna están en incremento constante usando diferentes líneas de evidencias (Lowe y Walker, 1997); tres enfoques han centrado su atención en explicar la dinámica de la vegetación a escala local y regional. En primer lugar, el enfoque paleoecológico con base en los registros polínicos y otros marcadores biológicos constituyen la principal línea de la evidencia de la historia de la vegetación (Godwin, 1975; Huntley y Webb, 1988). Estos marcadores han permitido mejorar los parámetros de caracterización de los climas (Islebe et al., 2016). En segundo lugar, el enfoque geográfico ha monitoreado, almacenado y analizado con mayor rapidez el estado actual de los recursos naturales (Mas et al., 2009; Velázquez et al., 2003). Es por esta razón, que los nuevos avances tecnológicos fortalecen la perspectiva de la geografía (Velázquez, Durán, Mas, Bray y Bocco, 2005). En último lugar, el enfoque bioclimático aporta una visión completa para reconocer la distribución de las comunidades vegetales con tan sólo tomar los climas (Rivas-Martínez, Rivas-Sáenz y Penas, 2011).

La dinámica de la vegetación es generalmente compleja, la cual requiere de enfoques de integración que apunten a generar modelos que satisfagan las necesidades del problema (Turner II et al., 2001). La integración de enfoques tiene impactos significativos en las ciencias ambientales en donde el principal interés es expandir la visión de la geografía (Turner II, 2002). Por esta razón, surge la necesidad creciente en entender los ecosistemas presentes y los procesos ecológicos que ocurrieron en el pasado de una forma integrada (Etter, McAlpine y Possingham, 2008). En la actualidad, algunos intentos se han

desarrollado para reconocer la distribución de los tipos de vegetación (Vaca, Golicher y Cayuela, 2011; Gopar y Velázquez, 2016). Otras investigaciones han realizado integraciones de enfoques para reconstruir los escenarios históricos con resultados muy alentadores (Leverington, Teller y Mann, 2002; Caseldine y Fyfe, 2006; Carrillo-Bastos et al., 2012; Correa Ayram et al., 2016). El propósito de la integración es generar bases de datos cuantitativas y georreferenciadas de alta resolución para entender la dinámica de la vegetación a escala regional (Leverington et al., 2002). A pesar de los esfuerzos que se han realizado, la reconstrucción espacial de la vegetación es aún limitada debido a la alta diversidad biológica, de relieve, de los climas y de la influencia de la actividad antrópica, los cuales complican tener una visión detallada. La integración de insumos como son; el análisis de cobertura de vegetación, el análisis de climas, los tipos de rocas, los tipos de relieves, el análisis polínico, el análisis de vegetación, la disección vertical, así como las herramientas de análisis en las que se encuentran el análisis multivariado y el Sistema de Información Geográfica (SIG), proporcionan una visión completa sobre la dinámica de la vegetación y su relación con los climas en ambientes con alta diversidad biológica. En la presente disertación se utilizó la disección vertical debido a que se encuentra disponible para todo México. Por lo tanto, la principal contribución de la presente disertación es conocer la dinámica de las comunidades vegetales a partir de la integración de enfoques paisajísticos (paleoecología, geografía, y bioclimatología).

En este sentido la presente investigación se llevó a cabo en la porción norte de Michoacán y sur de Guanajuato. El área de estudio se caracteriza por una alta diversidad biológica y una larga historia de ocupación por el imperio Purépecha o Estado Tarasco (Watts y Bradbury, 1982; Rzedowski y Calderón, 1987; Cué-Bär, Arredondo-Amezcuca, Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2006). Las investigaciones arqueológicas han reportado numerosos asentamientos antrópicos en mapas de etnias, mapas lingüísticos y extensión territorial en todo Michoacán, parte de Guanajuato, Guerrero y Jalisco (Pollard, 2003; Espejel-Carbajal, 2007; Albiez-Wieck, 2013). Por esta razón, la parte norte del área de estudio es la frontera del imperio Purépecha.

1.2 Planteamiento del problema

Los cambios en la temperatura y en la precipitación han afectado el funcionamiento del clima durante el periodo Cuaternario. Estos cambios han impulsado a fuertes modificaciones en la composición de las comunidades vegetales, en donde han favorecido

al establecimiento de las especies más resistentes a las nuevas condiciones climáticas (Islebe y Hooghiemstra, 1997; Caballero, Lozano-García, Vázquez-Selem y Ortega, 2010). Por ello, los cambios en el clima aunado a la amplia variedad de condiciones fisiográficas han dado como resultado alta riqueza florística en muchas regiones de México (Rzedowski, 2006). Esta es la principal razón por lo que es necesario recopilar información sobre los ambientes del pasado a fin de entender los procesos que están ocurriendo actualmente, así como los que podrían suceder en un futuro cercano (Islebe et al., 2016). Por tanto, la comprensión sobre los cambios ocurridos del pasado como; la diversidad geológica, la historia climática, los cambios en la vegetación y la evolución del ser humano ha tomado gran interés para muchos científicos (Lowe y Walker, 1997). Conocer, representar y cuantificar los cambios en la estructura espacial de la vegetación son algunos de los objetivos de los paleoecólogos (Sugita, 2007; Chaput y Gajewski, 2018) y en épocas recientes la representación de la vegetación por los geógrafos y los bioclimatólogos (Mas et al., 2004; Rivas-Martínez et al., 2011). Así, se ha podido reconocer con mayor certeza cuáles herramientas metodológicas e insumos proporcionan mayor información sobre las variaciones de la vegetación y el clima a escala local y regional.

La vegetación es la expresión evolutiva del agregado de especies vegetales en un lugar y en un tiempo determinado (Velázquez, Medina-García, Durán-Medina, Amador, Gopar-Merino, 2016). La representación de la vegetación es más evidente en la literatura científica en donde se ha monitoreado y evaluado el estado actual de la vegetación (Rounsevell, Annetts, Audsley, Mayr y Reginster, 2003; Velázquez et al., 2003; Mas et al., 2004,). Durante las últimas décadas, los avances en la cartografía de la vegetación se han logrado con la ayuda de las nuevas herramientas computacionales, las cuales han auxiliado para obtener mayor información y entendimiento sobre los recursos naturales. Estos avances son muy útiles en la actualidad dado que cuantifican el grado de transformación de la cubierta de vegetación en diferentes escalas temporales. Sin embargo, la reconstrucción espacial histórica de la vegetación es aún limitada (Carrillo-Bastos et al., 2012). El problema del conocimiento es que existe una baja coordinación de otras disciplinas, la inexistencia de un marco teórico integrado y la falta de una visión en conjunto de especialistas (Etter, 1991). Además, hay que agregar también la falta de utilización de las nuevas herramientas tecnológicas y computacionales, las cuales auxiliarían a la comprensión de la dinámica de la vegetación en diferentes periodos

temporales. Especialmente, mejorar la comprensión de la dinámica de la vegetación frente al cambio climático (Islebe et al., 2016) y el efecto de las actividades antropogénicas hacia la vegetación (Domínguez-Vázquez, Osuna-Vallejo, Castro-López, Israde-Alcántara y Bischoff, 2019).

El impacto de la actividad antrópica durante los últimos 5,000 años ha sido lento, constante y acumulativo con un incremento en el efecto invernadero incitando a un calentamiento gradual en el planeta (Ruddiman, 2003). Los cambios en el paisaje se han intensificado principalmente por las transformaciones de las coberturas y los diferentes usos de suelo (Velázquez et al., 2003; Durán, Bray, Velázquez y Larrazábal, 2011). Por ello, gran parte del territorio presenta un importante descenso de las áreas boscosas y, por ende, un incremento en pastizales, en matorrales y en las coberturas antrópicas (Mas et al., 2009). La alteración de los bosques nativos favorece la propagación de especies oportunistas y la entrada de plantas invasoras, la cual ocasiona la reducción de la diversidad y de la riqueza de los bosques (Smith y Smith, 2007). Por esta razón, es importante realizar una recopilación de información de las condiciones físicas, así como de su composición florística, estructura y aspecto funcional (Velázquez et al., 2016). Es por ello, que diversos sectores están interesados en la problemática ambiental y se vuelve un tema prioritario en la agenda política internacional, dado a que tienen influencias negativas a la actividad humana (Magañas-Rueda, 2004).

A lo largo del tiempo geológico existen evidencias donde las variaciones de temperatura y precipitación tienen un efecto preexistente sobre la vegetación (Correa-Metrio, Lozano-García, Xelhuantzi-López, Sosa-Nájera y Metcalfe, 2012). Por tal motivo, el clima es el principal parámetro para explicar la distribución de la vegetación a escala regional (Rivas-Martínez et al., 2011; Macías-Rodríguez, Peinado-Lorca, Giménez de Azcarate, Aguirre-Martínez y Delgadillo-Rodríguez, 2014). Tres enfoques han tratado de dar explicación sobre los procesos que han ocurrido en la vegetación y su relación con el clima. Los estudios paleoecológicos utilizan análisis de polen fósil y otros marcadores, estos estudios son un excelente indicador de las fluctuaciones climáticas y de la dinámica de la vegetación (Domínguez-Vázquez et al., 2019). Sin embargo, los estudios paleoecológicos necesitan de sitios adecuados, a saber; lagos, pantanos y turberas, en donde se conserven los microfósiles de una manera continua y sin interrupción (Lozano, 2004). Por ello, en regiones que no cuentan con las características de conservación de los microfósiles es difícil conocer las condiciones ecológicas que persistieron en el pasado. Por otro lado, en

orden de décadas, los estudios geográficos han adquirido mayor comprensión sobre la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas naturales (Bruner, Gullison, Rice y Fonseca, 2001). Los estudios bioclimáticos a partir de los valores cuantitativos de precipitación y de temperatura han reconocido la diversidad y la distribución de las comunidades de plantas (Rivas-Martínez et al., 2011; Peinado, Monje y Martínez-Parras, 2008); en donde han tratado de poner en manifiesto la relación existente entre lo biológico y lo climático (Peinado et al., 2008). Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones están basadas en modelos y pronósticos aislados que no han permitido comprender la dinámica espacial de la vegetación histórica. Por tal motivo, es urgente contar con un marco metodológico que permita integrar datos de diferentes disciplinas para realizar proyecciones de los escenarios históricos y principalmente reconocer la distribución de la vegetación en aquellas regiones que han tenido fuertes impactos antrópicos.

1.3 Justificación

La presente investigación es relevante dentro del análisis de los cambios en la cubierta de vegetación histórica y su relación con los elementos del paisaje. El estudio de la vegetación bajo el enfoque paisajístico resulta ser fundamental para entender los patrones corológicos de los tipos, comunidades y asociaciones vegetales (Velázquez, Medina y Reygadas, 2010). La presente disertación se realizó en el norte del estado de Michoacán y sur del estado de Guanajuato, México. Esta disertación tiene como propósito contribuir al desarrollo de nuevas herramientas metodológicas para la reconstrucción de los escenarios históricos.

La transformación de la cubierta de vegetación se ha ido incrementando debido al mal manejo de los recursos naturales. La fuerte presión antrópica durante largos periodos de tiempo ha contribuido a la desertificación y la degradación de los ambientes. Esta degradación en los paisajes naturales ha causado que algunas regiones no dispongan de registros detallados de la distribución de la vegetación nativa y que en la actualidad sólo se aprecien pequeños manchones relictuales. Por ello, muchos de los paisajes Mesoamericanos han estado fuertemente cultivados desde tiempos prehispánicos (Whitmore y Turner, 1992). Por esta razón, se necesita atender el problema del desconocimiento de los cambios de la vegetación del pasado. Este problema se ha analizado por tres enfoques principalmente (paleoecológico, geográfico y bioclimático) bajo diferentes líneas de partida. Los resultados de sus investigaciones suelen ser muy

alentadores en ciertas áreas en particular, pero no existe una coordinación en conjunto que auxilie y oriente la representación espacial de la cubierta de vegetación. Por esta razón, la presente disertación será abordada bajo la integración de enfoques paisajísticos. Por ello, la integración puede contribuir como un componente importante para comprender los procesos que sucedieron en el pasado e interpretar con mayor claridad lo que está ocurriendo en la actualidad. Además, la información generada puede servir como base para enriquecer las reconstrucciones paleoecológicas y así generar datos cuantitativos de alta resolución de la cobertura de vegetación, así como de los patrones climáticos. También podría tener un papel importante en el estudio de las actividades antrópicas y su manejo de los recursos naturales. Por último, la información generada sería un punto de partida para realizar mejores predicciones a largo plazo.

1.4 Diseño de investigación

1.4.1 Objetivo general

- Conocer la dinámica de las comunidades vegetales a partir de la integración de enfoques paisajísticos (paleoecología, geografía y bioclimatología). La integración de enfoques aportaría una visión detallada sobre los cambios de las comunidades vegetales en diferentes escalas temporales.

1.4.2 Objetivo particulares

- Desarrollar un método integrador de enfoques para la reconstrucción corológica de la vegetación. La integración ayudará a identificar qué elementos biofísicos son los que mayor definen la distribución de la cubierta de vegetación y con base en ello permita reconstruirlos espacialmente.
- Caracterizar la correlación entre el polen moderno y la vegetación en dos tipos de relieves. La correlación permitirá a identificar que taxa de polen aportan mayor información sobre su relación la vegetación local y regional.
- Desarrollar una metodología integradora de enfoques para expresar los cambios de los patrones de distribución espacial de la vegetación en diferentes periodos de tiempo. La integración de enfoques aportará a obtener un mejor panorama sobre la dinámica de la vegetación y el clima en regiones con alta diversidad geológica.

- Discutir la relevancia de la aproximación biofísica del paisaje para entender los grandes cambios de las condiciones ambientales actualmente.

1.4.3 Estructura del documento

La presente disertación está organizada de acuerdo a los objetivos descritos anteriormente. Los formatos y estructuras de cada capítulo obedecen a las demandas de las revistas. En el capítulo uno se presentó una revisión general sobre los enfoques que han intentado realizar estudios de cartografía y de reconstrucción de vegetación. En este capítulo nos permitió conocer cómo se ha hecho las reconstrucciones, cuáles son las aportaciones claves y reconocer las preguntas que aún no se responden. Asimismo, se expuso el planteamiento de problema, la justificación y los objetivos. En el capítulo dos se realizó una integración de enfoques para reconstruir el escenario de la vegetación. En este capítulo los elementos de paisaje fueron analizados jerárquicamente bajo perspectiva bioclimática. El almacenamiento y análisis de datos se desarrolló en el Sistema de Información Geográfica, el cual es un instrumento sólido para representar las formaciones vegetales nativas a escala regional. Este capítulo fue publicado en la revista *Biodiversity and Conservation* en el mes de noviembre del 2018. El capítulo tres se realizó un análisis para la caracterización de la lluvia de polen y los tipos de vegetación. El propósito de este capítulo fue reconocer que taxa presenta mayor relación con su vegetación correspondiente y reconocer su relación con los tipos de relieves. Este capítulo se someterá a la revista *Review of Palaeobotany and Palynology* a principios del siguiente año. El capítulo cuatro se procedió a integrar los datos actuales para realizar una aproximación de las condiciones ambientales que prevalecieron en el pasado. Este último capítulo es una contribución para un libro, el cual se publicó en el mes de diciembre del 2019. El libro se titula *The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico* publicado por *Springer Nature Switzerland AG*.

1.5 Bibliografías

Araújo, M. B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L., y Williams, P. H. (2004). Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 10(9), 1618–1626. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00828.x>

- Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Cornwell, W. K., Weiss, S. B., Hamilton, H., Branciforte, R., y Kraft, N. J. B. (2010). The geography of climate change: Implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions*, 16(3), 476–487. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00654.x>
- Albiez-Wieck, S. (2013). *Contactos exteriores del Estado Tarasco: influencias desde dentro y fuera de Mesoamérica*. Zamora, Michoacán, México: Colegio de Michoacán,
- Bruner, A. G., Gullison, R. E., Rice, R.E., y da Fonseca, G. A. B. (2001). Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. *Science* 291(5501), 125–8.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., ... Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 71–95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>
- Barrasa-García, S. (2017). Percepción del cambio climático en comunidades campesinas de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas, México. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 44–65.
- Cué-Bär, E. M., Villaseñor, J. L., Arredondo-Amezcuca, L., Cornejo-Tenorio, G., y Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín La Sociedad Botánica México*, (78), 47–81.
- Caseldine, C., y Fyfe, R. (2006). A modelling approach to locating and characterising elm decline/landnam landscapes. *Quaternary Science Reviews*, 25, 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.015>
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G. A., y Torrescano-Valle, N. (2012). Geospatial analysis of pollen records from the Yucatán peninsula, Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0355-1>
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., y Ortega, B. (2010). Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del

centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 359–377.

Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Xelhuantzi-López, S., Sosa-Nájera, S., y Metcalfe, S. E. (2012). Vegetation in western Central Mexico during the last 50 000 years: modern analogs and climate in the Zacapu Basin. *Journal of Quaternary Science*, 27(5), 509–518. <https://doi.org/10.1002/jqs.2540>

Chaput, M. A., y Gajewski, K. (2018). Relative pollen productivity estimates and changes in Holocene vegetation cover in the deciduous forest of southeastern Quebec, Canada. *Botany*, 96(5), 299–317. <https://doi.org/10.1139/cjb-2017-0193>

Espejel-Carbajal, C. 2007. *Etnohistoria y arqueología Tarasca*. Recuperado de <http://www.famsi.org/reports/06041es/06041esEspejelCarbajal01.pdf>.

Durán, E., Bray, D. B., Velázquez, A., y Larrazábal, A. (2011). Multi-scale forest governance, deforestation, and violence in two regions of Guerrero, Mexico. *World Development*, 39(4), 611–619. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.08.018>

Domínguez-Vázquez, G., Osuna-Vallejo, V., Castro-López, V., Israde-Alcántara, I., y Bischoff, J. A. (2019). Changes in vegetation structure during the Pleistocene–Holocene transition in Guanajuato, central Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 28(1), 81–91. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0685-8>

Etter, A. (1991). *Introducción a la ecología del paisaje. Un marco de integración para los levantamientos ecológicos*, Bogotá, Colombia, IGAC.

Etter, A., McAlpine, C., y Possingham, H. (2008). Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: A Regionalized Spatial Approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), 2–23. <https://doi.org/10.1080/00045600701733911>

Godwin, H. (1975). *The history of the British Flora* (2^a Ed.). Cambridge: Cambridge University press.

Gopar-Merino, L. F., y Velázquez, A. (2016). Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México.

Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía, (90), 75–88.
<https://doi.org/10.14350/rig.46688>

Huntley, B., y Webb III. T. (1988). *Vegetation history*. Dordrecht, Netherlands: Springer.

Islebe, G. A., y Hooghiemstra, H. (1997). Vegetation and climate history of montane Costa Rica since the last glacial. *Quaternary Science Reviews*, 16(6), 589–604.
[https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(96\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(96)00051-0)

Islebe, G. A., Domínguez-Vázquez, G., Espadas-Manrique, C., Figueroa-Rangel, B., González-Yajimovich, O., Hernández-Arana, H., ... Torrescano-Valle, N. (2016). Cambio climático: con- texto histórico, paleoecológico y paleoclimático. Tendencias actuales y perspectivas. In P. Balvanera, J. E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero y J. J. Schmitter-Soto (Eds), *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* (pp. 25-56). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269.
[https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)

Leverington, D. W., Teller, J. T., y Mann, J. D. (2002). A GIS method for reconstruction of late Quaternary landscapes from isobase data and modern topography. *Computers and Geosciences*, 28(5), 631–639. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00097-8)

Lowe J. J., y Walker, M. J. C. (1997). *Reconstructing Quaternary Environments* (2ª Ed.). London and New York: Routledge.

Lozano-García, S. (2004). Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje In J. Martínez y A. F. Bremauntz (Eds.). *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 65-76). México: Instituto nacional de ecología, secretaría de medio ambiente y recursos naturales.

Magañas-Rueda, V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. In J. Martínez y A. F. Bremauntz (Eds.). *Cambio climático: una visión desde México*

(pp. 17–8). México: Instituto nacional de ecología, secretaría de medio ambiente y recursos naturales.

- Macías-Rodríguez, M. A., Peinado-Lorca, M., Giménez de Azcarate, J., Aguirre-Martínez, J. L., y Delgadillo-Rodríguez, J. (2014). Clasificación bioclimática de la vertiente del Pacífico mexicano y su relación con la vegetación potencial. *Acta Botanica Mexicana*, 109, 133–165.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: A nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>
- Mas, J. F., Velázquez, A., y Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura / uso del suelo en la República Mexicana. *Investigacion Ambiental*, 1(1), 23–39.
- Pollard H. P. (2003). The Tarasca Empire. In E. Smith y F. F. Berdan (Eds). *The postclassic Mesoamerican world* (pp. 78-86). Salt Lake City: University of Utah press,
- Peinado-Lorca, M., Monje-Arenas, L., y Martínez-Parras, J. Ma. (2008). *El paisaje vegetal de Castilla-La Mancha*. Castilla-La Mancha, España: Cuarto Centenario.
- Priego-Santander, A., Bocco, G., Mendoza, M., y Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., y Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1(1), 1–638. <https://doi.org/10.5616/gg10001>

- Rodima-Taylor, D., Olwig, M. F., y Chhetri, N. (2011). Adaptation as innovation, innovation as adaptation: An institutional approach to climate change. *Applied Geography*, 33(1), 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.011>
- Ruddiman, W. F. (2003). Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change*, 61, 261–293. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-7278-0>
- Rounsevell, M. D. A., Annetts, J. E., Audsley, E., Mayr, T., y Reginster, I. (2003). Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95(2–3), 465–479. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00217-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00217-7)
- Rzedowski, J., y Calderón de Rzedowski, G. (1987). El bosque tropical caducifolio de la región Mexicana del Bajío. *Trace* 12:12–21.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Recuperado de www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf.
- Smith, T. M., y Smith, R. L. (2007). *Ecología* (6ª Ed.). Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Slaymaker, O. (2001). Why so much concern about climate change and so little attention to land use change? *Canadian Geographer*, 45(1), 71–78. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2001.tb01169.x>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., y Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102(3), 595–623. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Sugita, S. (2007). Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition, 2(2007), 229–241. <https://doi.org/10.1177/0959683607075837>
- Turner II, B. L., Meyer, W. B., y Skole, D. L. (1994). Global land-use/land-cover change: Towards an integrated study. *Ambio*, 23(1), 91–95.

- Turner II, B. L., Villar, S. C., Foster, D., Geoghegan, J., Keys, E., Klepeis, P., ... Vance, C. (2001). Deforestation in the southern Yucatán peninsular region: An integrative approach. *Forest Ecology and Management*, 154(3), 353–370. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00508-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00508-4)
- Turner II, B. L. (2002). Response to Thrift's "The future of geography." *Geoforum*, 33(4), 427–429. [https://doi.org/10.1016/s0016-7185\(02\)00027-1](https://doi.org/10.1016/s0016-7185(02)00027-1)
- Vaca, R. A., Golicher, D. J., y Cayuela, L. (2011). Using climatically based random forests to downscale coarse-grained potential natural vegetation maps in tropical Mexico. *Applied Vegetation Science*, 14(3), 388–401. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2011.01132.x>
- Velázquez, A., Durán, E., Ramírez, I., Mas, J. F., Bocco, G., Ramírez, G., y Palacio, J. L. (2003). Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: The case of Oaxaca, Mexico. *Global Environmental Change*, 13, 175–184. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00035-9)
- Velázquez, A., Durán, E., Mas, J. F., Bray, D., y Bocco, G. (2005). Situación actual y prospectiva del cambio de la cubierta vegetal y usos del suelo en México. *México ante los desafíos de desarrollo del milenio* (pp. 391–316). México, D. F.: Consejo Nacional de Población.
- Velázquez, A., Medina, C., y Reygadas, D. (2010). Síntesis geobotánica de las sierras Ajusco-Chichinautzin. *Investigación Ambiental.*, 2(1), 5–24. Retrieved from <http://www.revista.ine.gob.mx/issue/view/20#.UDqO39aTu0F>
- Velázquez, A., Medina-García, C., Durán-Medina, E., Amador, A., y Gopar-Merino, L.F., (2016) Standardized hierarchical vegetation classification. Mexican and global patterns. Springer, Switzerland, 143.
- Whitmore, T. M., y Turner II, B. L. (2008). Landscapes of Cultivation in Mesoamerica on the Eve of the Conquest. *Annals of the Association of American Geographers*, 82(3), 402–425.

Watts, W. A., y Bradbury, J. P. (1982). Paleoeological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Research*, 17(1), 56–70. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(82\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(82)90045-X)

Zonneveld, I. S. (1989). The land unit: A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology*, 3(2), 67–86. <https://doi.org/10.1007/BF00131171>

Zonneveld, I. S. (1990). Scope and concepts of landscape Ecology as an emerging science. *Changing Landscapes: An Ecological Perspective*, 3–20. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3304-6_1

Capítulo II. Reconstruction of native vegetation based upon integrated landscape approaches

2.1 Abstract

Reconstructing the vegetation landscape, as an indicator of climatic oscillations, has been often based upon pollen records guided by the so-called paleoecological approach. Outcomes of this approach, however, have limited chorological implications. The main objective of this manuscript is to develop an integrative method of approaches (bioclimatic and geographical) for the chorological reconstruction of the vegetation at the Purepecha region in central Mexico. The bioclimatic indexes were calculated from the raster layers of the Digital Climatic Atlas of Mexico and were analyzed via a Geographic Information System. The raster were reclassified into isobioclimates. The isobioclimates were overlapped with the current land cover, vertical dissection and rocks types to find correlation patterns. Originally, native vegetation types were forested, whereas currently these were replaced by agricultural encroachment. Correlations among isobioclimate, land form and rock type were used to reconstruct plant communities in polygons where native vegetation was vanished. The reconstruction was verified with 216 vegetation surveys and literature information, so that remaining vegetation elements and earlier reports were used as ground truth validation. On the whole, six vegetation types were recognized. The Tropical dry broadleaved sub-deciduous of *Albizia-Senna-Bursera* forest was the most outstanding and the one that occupied the largest surface with 51%. On the other hand, the Tropical dry spiny-succulent evergreen-sub-deciduous of *Randia-Opuntia-Stenocereus* shrubland was the least represented with 1%. The integration of landscape approaches, hierarchically analyzed, were key to reconstruct the native vegetation. Our results contribute to the understanding of plant communities in a region with a large degree of vegetation transformation. The above may further serve to enrich ongoing research about the chorological reconstruction of the historical landscape.

2.2 Introduction

The vegetation distribution patterns are mainly driven by climate, geomorphological, soil conditions, and ecological components that interact simultaneously (Velázquez, Medina-García, Durán-Medina, Amador & Gopar-Merino, 2016). During the last decades the attention has been focusing on the reconstruction of vegetation in the landscape considering these attributes independently. Climate, mainly via pollen records, has been mainly the main source for reconstructing vegetation scenarios. Thus, integrated approaches aiming at reconstructing vegetation patterns making use of available

resources such as pollen analyses, geographic information systems and local botanical knowledge are scanty. Holistic approaches are crucial to promote knowledge of the processes that occurred in the past and to observe the movements of each of the plant communities in different temporal scales (Pedrotti, 2004). There are three approaches that focus their attention in explaining the dynamics of vegetation in the landscape with different disciplinary departing points. Often, the vegetation reconstruction is explored by the paleoecological approach based on palynological analysis and other proxies, both providing valuable information about variations in the plant communities in response to global warming (Islebe et al., 2016). Most of paleo-landscape studies do not fully understand the dynamics of the historical landscape because of its punctual nature (Novenko et al., 2016). Studies of past conditions have used some landscape approaches to reconstruct the different vegetation settings based upon the most characteristic pollen taxa (Brubaker, Anderson & Edwards, 2005). Sugita, Parshall, Calcote & Walker (2010) use a set of models to estimate the source area of the pollen fossil and determine the composition of the regional vegetation and local vegetation. Others incorporate pollen fossil data sets and landscape components (Caseldine & Fyfe 2006; Carrillo-Bastos, Islebe & Torrescano-Valle, 2012).

The geographical perspective through remote sensing and Geographic Information System (GIS) provide figures and diagnoses of the natural status of vegetation coverage in certain periods of time (Velázquez, Durán, Mas, Bray & Gerardo, 2005). Recent records are reported by the bioclimatic perspective to explain and predict the distribution of plant communities on a regional scale (Rivas-Martínez, Rivas-Sáenz & Penas-Merino, 2011; Gopar-Merino & Velázquez 2016). However, a few studies attempt to integrate each of the approaches to explore the changes in vegetation at different time periods. Therefore, the reconstruction of the native vegetation patterns is still a pending task, especially in regions with high biological, anthropic and climatic diversity. The most complete chorological effort was reported by Gopar-Merino & Velázquez (2016) based on the integration of the geographical and the bioclimatic approach under a framework of Boolean prediction. Nevertheless, this effort lack the input of conventional paleoecological data.

To understand the complexity of vegetation cover it is necessary to consider the integral studies provided by Geographical Information Systems. GIS facilitates the unification of approaches, data management, processing (Gaudin, Marguerie & Lanos, 2008) and

numerous statistical techniques to better understand biodiversity (Foody, 2008). The use of integration is to take advantage of each of the tools, methodologies and simplify information processing. In addition, the integration under the perspective of the bioclimatic approach, hierarchically organized, can provide more information about the distribution of vegetation cover (Gopar-Merino, Velázquez & Giménez de Azcárate, 2015).

The Purepecha region harbors high floristic diversity where it is possible to find mixtures of plant communities with Holarctic and Neotropical affinities (Cué-Bär, Villaseñor, Arredondo-Amezcu, Cornejo-Tenorio & Ibarra-Manríquez, 2006). Nowadays, this diversity is widely documented (Rzedowski & Calderón, 2013), its different degrees of degradation (Mas et al., 2004) and its relation with climates (Medina-García, Gopar-Merino, Giménez de Azcárate & Velázquez, 2012). However, this diversity has been in constant pressure by human activity (Lozano-García, Torres-Rodríguez, Ortega, Vázquez & Caballero, 2013). This leads to insufficient spatial knowledge of the vegetation and cannot be quantitatively compared in their contextual landscape (Velázquez et al., 2016).

The main aim of the article is to develop an integrative method of approaches for the chorological reconstruction of the vegetation. It is here stated that the approaches (bioclimatic and geographic) separately do not offer a pattern of rigorous historical distribution of the vegetation. A joint contribution bioclimatic and geographic, conversely, deepens in the understanding of plant community distribution patterns and facilitates conducting reconstruction and foreseen scenarios.

2.3 Methods

2.3.1 Study area

The area covers 12,698 km² (Fig. 1). It is located in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF), in the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt in central Mexico (Cano-Cruz & Carrasco-Núñez, 2008). The MGVF presents a long geological history that proceeds since the Quaternary period, housing more of 1,000 volcanic cones (Garduño-Monroy, 2009) and it is common find basalts, andesites, dacites, rhyolites, ignimbrites (Cano-Cruz & Carrasco-Núñez, 2008).



Figure 2. 1 Study area at the Purepecha region, Mexico (12, 698 km²) with reference to the main towns.

The altitudinal gradient ranges between 1,800 m.a.s.l. (meter above sea level) at the plains of Bajío to 3,400 m.a.s.l. at Cerro La Nieve and Cerro Burro located in the Purepecha area. The climate is sub-humid temperate with rainfall in summer and an average annual precipitation of 1,000-1,300 mm. In the northern portion, in the Bajío, a semi-warm sub-humid climate dominates the area with precipitation less than 600 mm. The average annual temperature fluctuates between 6 and 20 °C (INEGI, 2009).

Rigorous botanical surveys are scanty. Yet, dominant land cover types have been described so that above 2,000 elevations; *Pinus*, *Quercus* and *Arbutus* prevailed (Molina-Paniagua & Zamudio-Ruíz, 2010). At lower elevations, *Acacia*, *Bursera*, *Cedrela*, *Condalia*, *Euphorbia*, *Erythrina*, *Eysenhardtia*, *Forestiera* and *Yucca* (Rzedowski and Calderón, 1987) are more conspicuous. The study area has been subjected to a large landscape transformation. To further exemplify this, over 60 per cent of the area has been transformed from native vegetation into agricultural land; and only about 30% of the original vegetation prevails, with elements of secondary vegetation and scattered in patches of forests.

2.3.2 Bioclimatic analysis

The isobioclimates were calculated using the databases of the Digital Climatic Atlas of Mexico. The base is available in raster format (with pixels approximately one km²) containing average monthly temperature data, minimum average temperature, maximum average temperature and average precipitation from 1902 to 2011. Each of the raster layers were incorporated into the GIS (ArcGis 9.3) to calculate the bioclimatic indexes (for further information see Gopar et al., 2015). The indexes used were the annual Ombrothermic Index ($I_o = (P_p/T_p) * 10$), Ombrothermic Index of the driest bimester of the driest quarter of the year ($I_{od2} = P_{pd2}/T_{pd2} * 10$) and Thermicity Index ($I_t = (T + m + M) * 10$) (see more details in Rivas-Martínez et al., 2011). Each of the mathematical geoprocessing were performed in the Raster Calculator using the Python syntax. The Raster Calculator tool execute algebra expressions of maps that generated outputs from a new raster. The results of the operations of the indexes were compared with the keys developed by Rivas-Martínez et al. (2011) with the intention of identifying bioclimates, thermotypes and ombrotypes. The combination of the last three corresponded to the isobioclimates. Hence, isobioclimates were regarded as the main input to correlate climate with plant communities

2.3.3 Integrating landscape components

In this study, the Standardized Hierarchical Mexican Vegetation Classification System (SECLAVEMEX for the Spanish acronym) developed by Velázquez et al. (2016) was adopted, because it allowed the understanding, characterization and congruent cartographic representation of vegetation, represented as mosaics. The classification system is organized into eight hierarchical levels; biome, major formation, formation, sub-formation, series of association, association, sub-association and facies. Therefore, the vegetation covers derived from National Institute for Statistic and Geography Series IV (INEGI for the Spanish acronym, scale 1: 250,000) (INEGI, 2013) were re-categorized as series of association. All human covers were labeled as “no data”. The vector data of the vertical dissection (Scale 1: 250,000) or relative height (m/ Km²) of Mexico topography (Priego-Santander, Isunza-Vera, Luna-González & Pérez-Damián, 2003), rock types (scale 1: 250,000) (INEGI, 1984) and the isobioclimates previously generated were also used.

2.3.4 Reconstruction of the vegetation landscape

The construction of vegetation landscape followed the guidelines of Boolean logic or Boolean algebra (Barco-Gómez, 2005; Gopar-Merino & Velázquez 2016). The first part consisted in integrating all the data collected in the GIS. The vector data of the isobioclimates and the land cover derived by INEGI were overlaying. This procedure made it possible for the geometric conjunction of entities of both to generate a set of classes through field calculations that allowed to establish reciprocity in all the records. Subsequently, vertical dissection and rock types were incorporated into the same GIS database. The second part consisted in thoroughly examining the combinations of the landscape components that denoted patterns of plant communities. This information allowed to reconstruct polygon by polygon the areas labeled as “no data”. For those vegetation covers that presented the same relationships with some of the landscape components, its climatic preference for each vegetation was taken into consideration. Water bodies were not taken into account to reconstruct its surface, therefore; they remained as such. The rendering set was reflected in the following Boolean logic formula.

If {PxTCVA: one Isobioclimatea ^ one DisecVer.a ^ one Geo.a}

P PyTCVp = PxTCVA, \hat{U} {PSDA: one Isobioclimatea ^ one DisecVer.a ^ one Geo.a}

\hat{I} PSDB: Isobioclimatéb ^ one DisesVer.b ^ one Geo.b}

Where PxTCVA is the polygon “X” is the current vegetation association series, PyTCVp is Polygon “Y” of the reconstructed vegetation type, PSD is Polygon “no data” of the vegetation surface type, DisecVer is Vertical dissection, Geol is Rocks types.

The vegetation cover map is presented on a scale of 1: 250,000 with a minimum mapping unit of one km² and projected to NAD 1927 UTM 14 N Zone.

Four steps were imperative for the analysis of the operations: the compilation of the approaches database, entry data arrangement into the GIS, and the composition of current vegetation and its relation to climate (Fig. 2).

2.3.5 Validation of the land cover map

The validation of the map was based on existing literature information and fieldwork. In the area, 66 vegetation surveys obtained from CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 97 from CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) and ten from Medina-García (2016) were grouped, georeferenced and used as main input. All points overlapped with the isobioclimates vector base, vegetation types (INEGI) and the reconstructed map. This allowed the establishment of a set of data classes to identify areas that lacked surveys. In addition to the previous vegetation surveys, 43 tree vegetation surveys were carried out during spring and summer of 2017. For areas with high transformation, guided field trips were carried out in search of vegetation relicts. The characterization of the vegetation followed the Phytosociological method emphasizing plant groupings or formations of the Zürich-Montpellier school (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). Plant communities were assessed on basis of their life forms such as trees, shrubs and herbs. Coverage per species was also estimated as the total cover projected on the ground either per species as a whole as well as per life form. Relevés site was selected as a homogeneous site representative of its context. At each relevé, physiographic, layer coverage, conservation status, foliar condition, leave morphology, dominant leave size, presence of spines and succulent tissues were recorded (Velázquez et al., 2016). Further species identification, for those taxa do not recognized directly in the field, was conducted in the herbarium under the guidance of expert botanist. The botanical specimens that were collected were deposited in the “Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental” of the “Universidad Nacional Autónoma de México” for future reference.

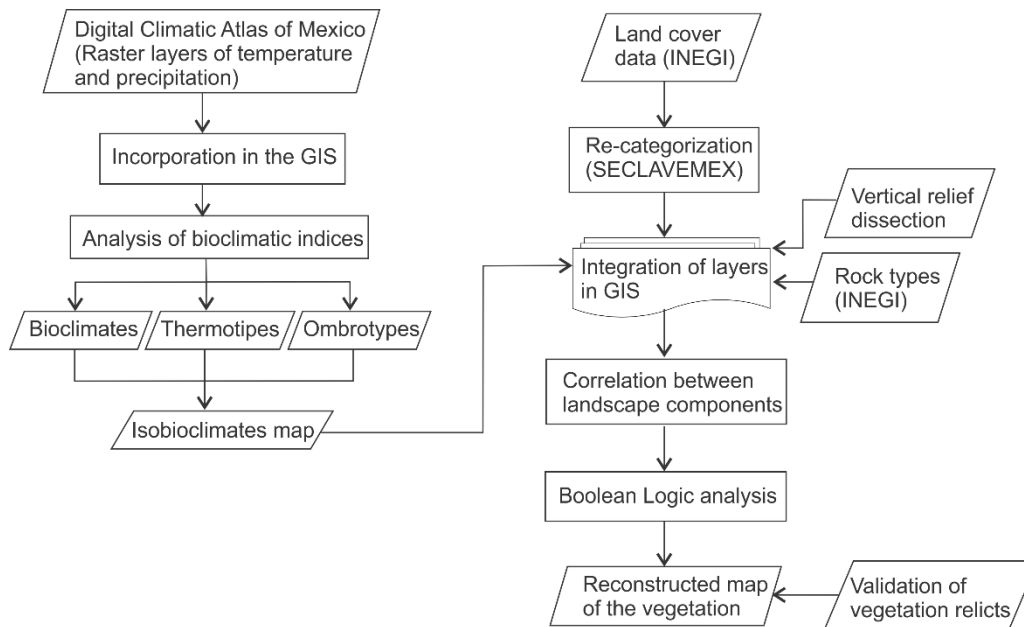


Figure 2. 2 Chart of the landscape reconstruction process. The image represents the main phases in each one of the perspectives. The GIS was fundamental tool for integrating spatial and local data

2.4 Results

The integration of landscape approaches (bioclimatic and geographical) allowed the construction of a methodological framework that led to the reconstruction of the native vegetation distribution pattern. The outcome was field verified by visiting areas in the neighborhood sharing similar climatic, land forms and soils and where native vegetation remains. This exercise was conducted in 216 vegetation surveys and 186 sites with relict vegetation, which correspond to the vegetation reconstructed. The bioclimatic analysis was determined by five isobioclimates resulting from the combination of thermotypes, ombrotypes and bioclimates (Fig. 2.3). The vegetation types, according to INEGI, and literature information presented by distribution fragmentary and dominated for anthropic cover (Fig. 2.4: map of INEGI reclassified for the purpose of this paper).

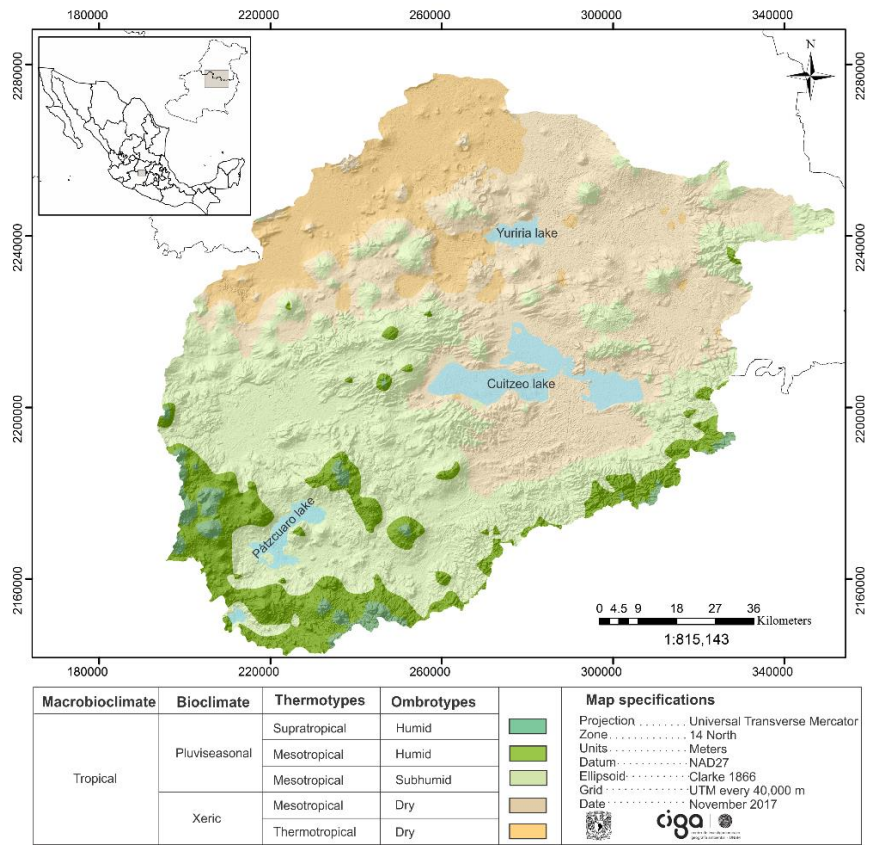


Figure 2. 3 Map of the current isobioclimates at the Purepecha region, Mexico

Isobioclimates and vegetation types follow general elevation gradients going from 1,800 to 3,400 m.a.s.l. From the highest elevation moving downwards the zoning was as follows. Tropical Pluvisesonal Supratropical Humid ranged from 2,800 to 3,400 elevation. Tropical Pluvisesonal Mesotropical Humid, in turn was limited from 2,400 to 2,800 elevation. Tropical Pluvisesonal Mesotropical Sub-humid distributed from 2,000 to 2,400. Tropical Xeric Mesotropical Dry runs from 1,900 to 2,000 elevation. Tropical Xeric Thermotropical Dry is limited to the lower elevation between 1,800 and 1,900 m.a.s.l. It is worth mention that the lowest three Isobioclimates (from 2,400 elevation downwards) harbor more than one vegetation type so that one to one relationships were not found. That is to say that in lower elevation other biophysical factors such as land form and soils also play a driving force to explain distribution patterns of vegetation types (Fig. 2. 5a). In total, 46 samples of plant communities and field trips in the study area gave evidence that *Albizia*, *Senna* and *Bursera* have higher preference for the Tropical xeric mesotropical dry, but are also common in the Tropical xeric thermotropical dry. On

the other hand, *Quercus* and *Arbutus* proved higher association as well as limited to the Tropical pluvisesonal mesotropical sub-humid (Fig. 2.5b).

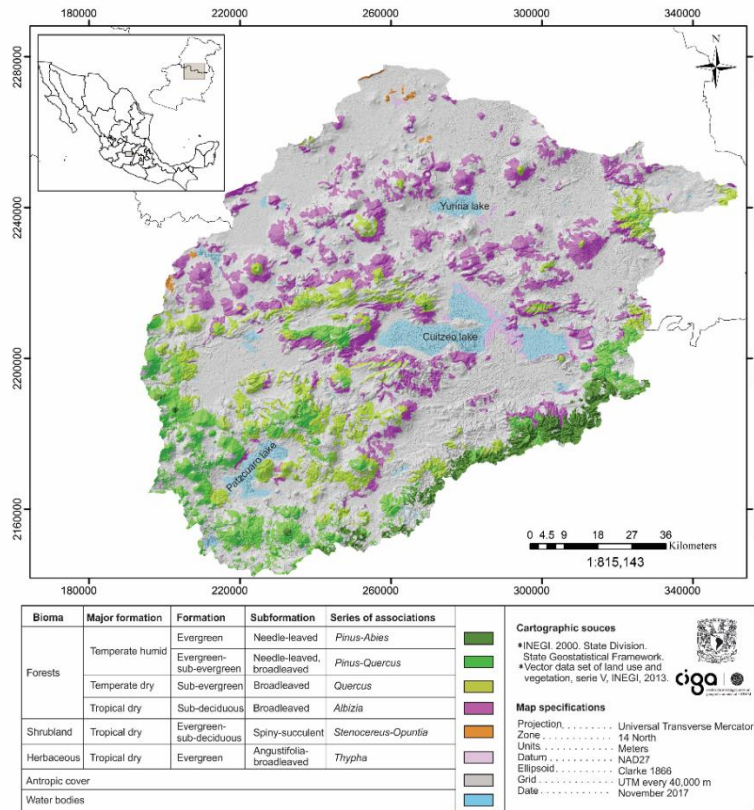


Figure 2. 4 Distribution of current vegetation cover at the Purepecha region, Mexico. The gray spaces are some type of anthropic cover, labeled as “no data”

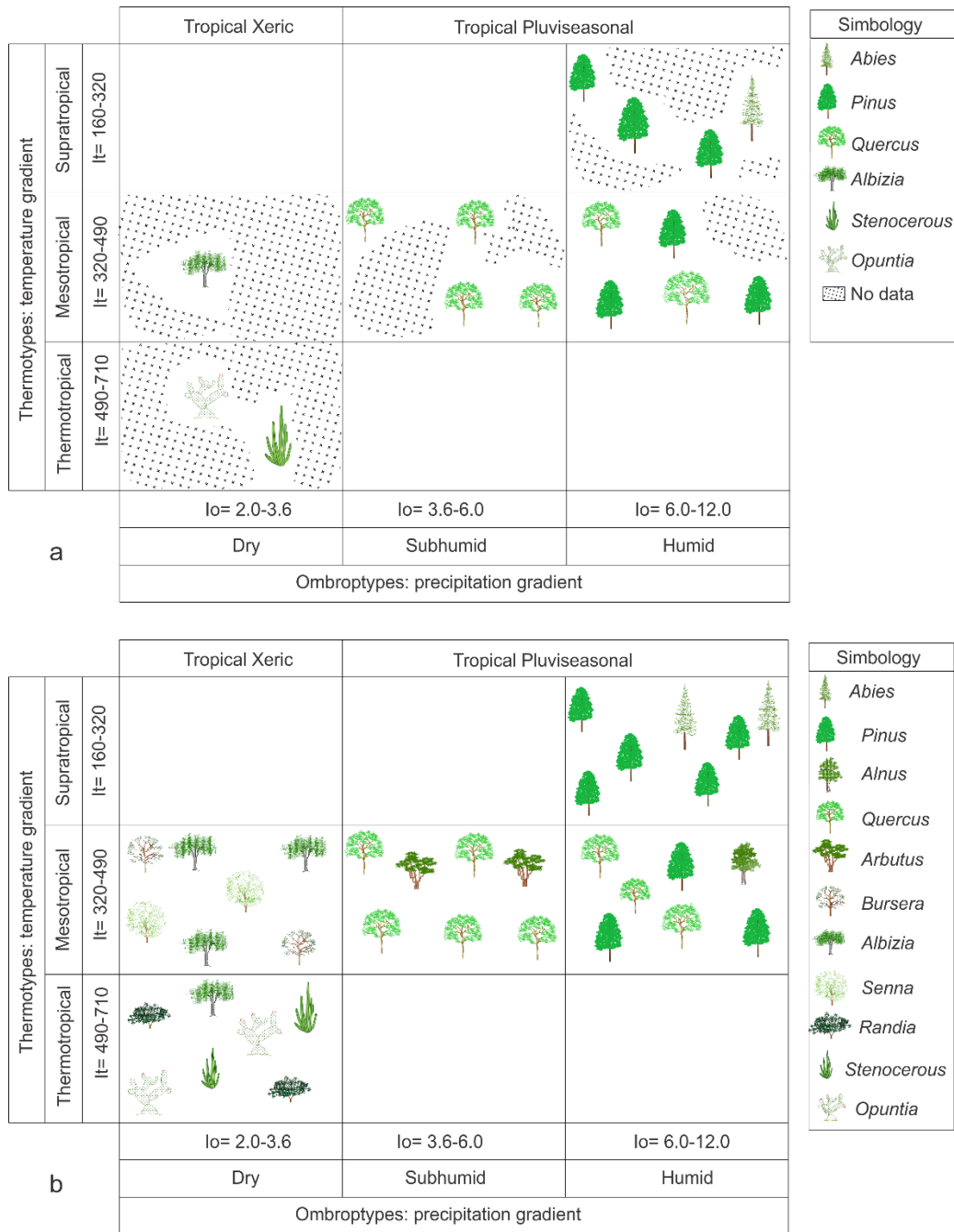


Figure 2. 5 Distribution of the main types of vegetation based on the climatic gradient. **a)** Relation of isobioclimates with vegetation cover according to INEGI. For the recorded isobioclimates it is unknown what type of vegetation should have conformed in the present. **b)** Relicts of vegetation that prevail isolated allowed to recognize the most representative arboreal elements in each isobioclimate. It is observed that climates regionally prevailed as core factor for the distribution of vegetation patterns. (Color figure online)

Although the integration of approaches made the reconstruction of the native vegetation distribution pattern possible, the role played by bioclimatic was significantly more helpful. Between 1,800 and 2,000 m.a.s.l. The Tropical dry broadleaved sub-deciduous of *Albizia-Senna-Bursera* forest dominated the study area with 6,480.7 km² of the total surface, 51.03% of the area where this is considered the zonal vegetation type. The Tropical dry spiny-succulent evergreen-sub-deciduous of *Randia-Opuntia-Stenocereus* shrubland and the Tropical dry angustifolia-broadleaved evergreen of *Thypha-Cyperus-Phragmites* herbaceous covered less than 700 km², less than 5% of the total area and both are regarded as azonal vegetation types (Fig. 2.6). The Temperate dry broadleaved sub-evergreen of *Quercus-Arbutus* forest ranges from 2,000 to 2,400 m.a.s.l and covers 2,860.8 km², about 22.52%. At higher elevations (2,400–2,800), the temperate humid needle-leaved broadleaved evergreen-sub-evergreen of *Pinus-Quercus-Alnus* forest was distributed covering 1,557.6 km², about 12.3%. In the highest elevations (above 2,800 m) the Temperate humid needle-leaved evergreen of *Pinus-Abies* forest prevails covering about 3.5% (Fig. 2.6).

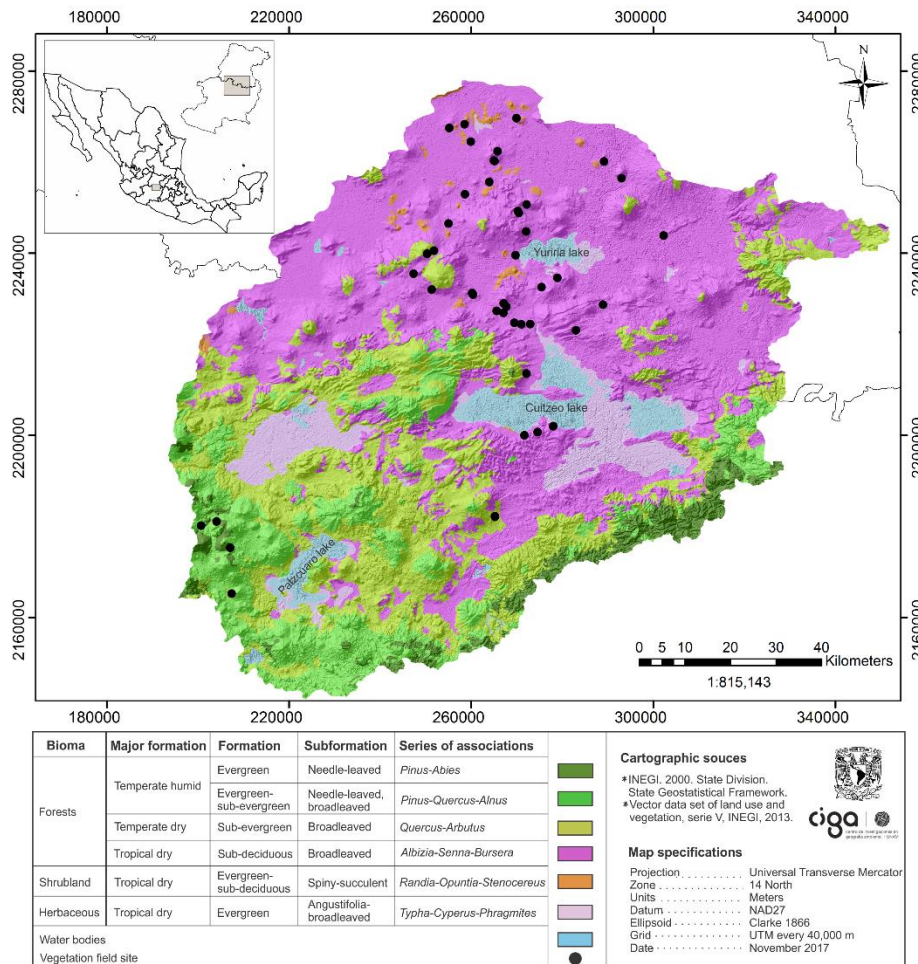


Figure 2. 6 Reconstructed map of the native vegetation patterns at the Purepecha region approximately 150 year ago when current anthropogenic influence was negligible. The distribution of the six vegetation types followed an altitudinal/climatic gradient. (Color figure online)

2.5 Discussion

The integration of approaches (bioclimatic and geographical) analyzed in a GIS proved to be an efficient tool for the reconstruction of the native vegetation formations on a regional scale. This further allowed precise chorological distribution of this vegetation formations, issue that has been poorly investigated since the large majority of the climatic and vegetation reconstruction efforts are based upon paleoecological methods limited to sites where the cores were taken (He, Bräuning, Griebinger, Hochreuther & Wernicke, 2018). Traditional extrapolation analyses disregard the landscape complexity. In this context, methodological integration offers an approach to predict historical distribution patterns of vegetation formations. Specifically, in areas where present information about native vegetation is scanty (Carrillo-Bastos et al., 2012).

Four methodological steps were essential for the reconstruction of native vegetation distribution patterns. The first was the compilation of information of each of the approaches; the second, the adequate use of the databases (point and spatial data) analyzed in GIS. Carrillo-Bastos et al. (2012) argue that GIS is useful for moving from point data to spatial data, thus it could be used to understand variations of the past vegetation cover. Recently, some studies apply it to the paleoecological analysis to map the vegetation in different temporal periods (Gaudin et al., 2008; Carrillo-Bastos et al., 2012). The third, an adequate correlation between landscape components allows it to have valuable elements to interpret vegetation changes through time (Gaudin et al., 2008). And the fourth, appropriate strategies oriented to validate vegetation relicts (Brinkmann, Patzelt, Schlecht & Buerkert, 2011). However, according to Brzeziecki, Kienast & Wildi (1993) there is a discrepancy between the simulated information and field data, particularly in the transition zone of vegetation formations. In the same way, Vaca, Golicher & Cayuela (2011) state that validation is complicated because of the strong anthropic impact where there is no guarantee for the current vegetation corresponding to the theoretical vegetation. However, ground verification and regional comparisons can enrich the model, especially in sites with similar environmental conditions (Moravec,

1998). In a way, they are used as a methodological basis for an adequate reconstruction of Paleolandscape (Zerbe, 1998). Other authors suggest that the diagnosis of plant species provides rigorous information about their relationship with climatic patterns along the altitudinal gradient (Medina-García et al., 2012; Giménez de Azcárate, Macías-Rodríguez & Gopar-Merino, 2013). This information is strengthened by a rigorous bioclimatic analysis that offers a panorama about the changes of the vegetation distribution pattern on a regional scale (Gopar et al., 2015). Therefore, we can say that the correlations between each of the landscape components, hierarchically organized, make it possible to reconstruct patterns of the native vegetation formations.

The area is experiencing abandonment because peasants are migrating either to urban areas or to United States. This abandonment pattern has been reported in similar regions (Rzedowski and Calderón, 1987). If this happens, vegetation may recover as documented by Newmark & McNeally (2018). We foresee that the Tropical dry broadleaved sub-deciduous of *Albizia-Senna-Bursera* forest would expand significantly the region. Indeed, these tree genera are dominates in the biomass of the Tropical dry forest of Mexico (Rzedowski and Calderon, 2013). Lozano-García et al. (2010) report a considerable rise of this vegetation during the last 1000 years on Los Tuxtlas, Veracruz. Both the decline of Prehispanic populations and the expansion of agricultural activities contributed to their rapid recovery (Goman & Byrne, 1998). Now this vegetation is one of the most essential in the Michoacan state (Cué-Bär et al., 2006), and it constitutes to one of five the most important ecoregions of America (Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa, 2010).

The integration of landscape approaches provided a solid foundation and a clear delineation to reconstruct historical landscapes. The methodological steps in progressive order provide a better understanding about the vegetation model and enriching the correlations of the plant species with the types of climates (Medina-García et al., 2012). This research did not perform a paleoecological analysis, it only provides a hypothetical approach about how it could be integrated into the model. Ongoing research in the study are will do so. For this reason, this information merge with a reliable model can be an effective tool to reconstruct the different vegetation environments in different time periods. The limitation of the present study lies in the quantity and quality of input data, since a poor choice of inputs could provide speculative results (Brouwer, 2013). This is the reason to compare our output to other regions harboring similarly landscape conditions so that certainty was validate. Although the model is a test stage it could be

improved if soil formation factors are taken into consideration, but its use must be sensible because it is well documented that an evolutionary process continues (Bautista, Palma-López & Huchin-Malta, 2005). Thus far, few historical maps have been made on the distribution of vegetation formations, especially for evaluating vegetation changes quantitatively and their degree of deforestation. Most of the historical landscape research is limited to the point description leaving voids of information where they have not been studied. The appropriate choice of historical data should include continuous, calibrated and standardized records on environmental conditions that allow the understanding of past processes. Gopar-Merino et al. (2015) report that the isobioclimates are the main factor that limit the distribution patterns of vegetation formations on regional scale; therefore, there is a close relationship between climate and vegetation patterns.

The integration showed correlation in each of the approaches, especially the climate and the vegetation patterns. This information can serve as a baseline for future paleoecological reconstructions to move from point data to spatial data and thereby have a better understanding of the dynamics of vegetative cover against climate change. Mainly where the human activity played an important role for transforming native vegetation patterns.

2.6 References

- Barco-Gómez, C. (2005). *Álgebra booleana. Aplicaciones tecnológicas*. Manizales, Colombia: Universidad de Caldas.
- Bautista, F., Palma-López, D., & Huchin-Malta, W. (2005) Actualización de la clasificación de suelos del estado de Yucatán. In F. Bautista & G. Palacio (Eds.) *Caracterización y manejo de los suelos de la península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales* (pp. 105-122). Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- Brinkmann, K., Patzelt, A., Schlecht, E., & Buerkert, A. (2011). Use of environmental predictors for vegetation mapping in semi-arid mountain rangelands and the determination of conservation hotspots. *Applied Vegetation Science*, 14(1), 17–30. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01097.x>

- Brouwer, M. (2013). Reconstructing “total” paleo-landscapes for archaeological investigation: an example from the central Netherlands. *Journal of Archaeological Science*, 40, 2308–2320. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.01.008>
- Brubaker, L. B., Anderson, P. M., & Edwards, M. E. (2005). Beringia as a glacial refugium for boreal trees and shrubs: new perspectives from mapped pollen data. *Journal of Biogeography*, 32, 833–848. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01203.x>
- Brzeziecki B., Kienast, F., & Wildi, O. (1993). A simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland. *Journal of Vegetation Science*, 4, 499–508. <https://doi.org/10.2307/3236077>
- Cano-Cruz, M., & Carrasco-Núñez, G. (2008). Evolución de un cráter de explosión (maar) riolítico : Hoya de Estrada, campo volcánico Valle de Santiago, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 549–564.
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G. A., & Torrescano-Valle, N. (2012). Geospatial analysis of pollen records from the Yucatán peninsula, Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0355-1>
- Caseldine, C., & Fyfe, R. (2006). A modelling approach to locating and characterising elm decline / landnam landscapes. *Quaternary Science Reviews*, 25, 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.015>
- Cué-Bär, E. M., Villaseñor, J. L., Arredondo-Amezcu, L., Cornejo-Tenorio, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, (78), 47–81.
- Foody, G. M. (2008). GIS: biodiversity applications. *Progress in Physical Geography*, 32(2), 223–235. <https://doi.org/10.1177/0309133308094656>
- Garduño-Monrroy, V. (2009) El relieve. In L. E. Villaseñor-Gómez (Ed.) *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado* (pp. 21–24). Michoacán, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO),

Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

- Gaudin, L., Marguerie, D., & Lanos, P. (2008). Correlation between spatial distributions of pollen data, archaeological records and physical parameters from north-western France: a GIS and numerical analysis approach. *Vegetation History and Archaeobotany*, 17, 585–595. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0172-8>
- Giménez de Azcárate, J., Macías-Rodríguez, M. A., & Gopar-Merino, F. (2013). Bioclimatic belts of Sierra Madre Occidental (Mexico): A preliminary approach. *International Journal of Geobotanical Research*, 3, 19–35. <https://doi.org/10.5616/ijgr>
- Goman, M., & Byrne, R. (1998). A 5000-year record of agriculture and tropical forest clearance in the Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *The Holocene*, 8, 83–89.
- Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., & Giménez de Azcárate, J. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1890/ES14-00138.1>
- Gopar-Merino, L. F., & Velázquez, A. (2016). Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía*, (90), 75–88. <https://doi.org/10.14350/rig.46688>
- He, M., Bräuning, A., Griebinger, J., Hochreuther, P., & Wernicke, J. (2018). May–June drought reconstruction over the past 821 years on the south-central Tibetan Plateau derived from tree-ring width series. *Dendrochronologia*, 47(December 2017), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.12.006>
- INEGI. (1984). *Mapa geológico de México a escala 1:250 000*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México (map) [pdf]. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004662>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. León, Guanajuato* [pdf]. Retrieved from

http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/11/11015.pdf

INEGI. (2013). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión)*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/Default.aspx>.

Islebe, G. A., Domínguez-Vázquez, G., Espadas-Manrique, C., Figueroa-Rangel, B., González-Yajimovich, O., Hernández-Arana, H., ... Torrescano-Valle, N. (2016). Cambio climático: contexto histórico, paleoecológico y paleoclimático. Tendencias actuales y perspectivas. In P. Balvanera, J. E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero & J. J. Schmitter-Soto (Eds.), *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* (pp. 25-56). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Lozano-García, S., Caballero, M., Ortega, B., Sosa, S., Rodríguez, A., & Schaaf, P. (2010). Late Holocene palaeoecology of Lago Verde: Evidence of human impact and climate change in the northern limit of the neotropics during the late formative and classic periods. *Vegetation History and Archaeobotany*, 19, 177–190. <https://doi.org/10.1007/s00334-010-0240-8>

Lozano-García, S., Torres-Rodríguez, E., Ortega, B., Vázquez, G., & Caballero, M. (2013). Ecosystem responses to climate and disturbances in western central Mexico during the late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 370, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.12.006>

Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: A nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>

Medina-García, C. (2016). *Bases para el conocimiento de los pisos bioclimáticos, la vegetación y la flora del occidente de Michoacán (México)* (Doctoral dissertation) Universidad de Santiago Compostela, Galicia, España.

- Medina-García, M., Gopar-Merino, L. F., Giménez de Azcárate, J., & Velázquez, A. (2012). Análisis bioclimático y estudio de la vegetación del transecto Pico de Tancítaro-Valle de Apatzingán, Michoacán, México. In J. F. Mas & G. Cuevas-García (Eds.), *XIX reunión nacional sociedad de percepción remota y sistema de información geográfica (Memorias)* (pp 293–301). Morelia, Michoacán: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Jaroslav, M. (1998). Reconstructed natural versus potential natural vegetation in vegetation mapping a discussion of concepts. *Applied Vegetation Science*, *1*, 173–176.
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, D. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Newmark, W. D., & McNeally, P. B. (2018). Impact of habitat fragmentation on the spatial structure of the Eastern Arc forests in East Africa: implications for biodiversity conservation. *Biodiversity and Conservation*, *27*(6), 1387–1402. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1498-x>
- Novenko, E. Y., Tsyganov, A. N., Rudenko, O. V., Volkova, E. V., Zuyganova, I. S., Babeshko, K. V., ... Mazei, Y. A. (2016). Mid- and late-Holocene vegetation history, climate and human impact in the forest-steppe ecotone of European Russia: new data and a regional synthesis. *Biodiversity and Conservation*, *25*(12), 2453–2472. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1051-8>
- Pedrotti, F. (2004). *Cartografía Geobotánica*. Italy: Pitagora Bologna.
- Portillo-Quintero, C. A., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation*, *143*, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020>
- Priego-Santander, A. G., Isunza-Vera, E., Luna-González, N., & Pérez-Damián, J. L. (2003). *Tipos morfológicos del relieve de México, a escala 1:250 000*. México: Dirección General de Investigaciones en Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología (INE), Secretaría de medio ambiente

- y recursos naturales (SEMARNAT). Retrieved from <http://www.emapas.inecc.gob.mx/>.
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., & Penas, A. (2011) Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany* 1:1–634. <https://doi.org/10.5616/gg110001>
- Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (1987). El bosque tropical caducifolio de la región Mexicana del Bajío. *Trace* 12:12–21.
- Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botánica Mexicana* 102:1–23
- Sugita, S., Parshall, T., Calcote, R., & Walker, K. (2010). Testing the Landscape Reconstruction Algorithm for spatially explicit reconstruction of vegetation in northern Michigan and Wisconsin. *Quaternary Research*, 74(2), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.07.008>
- Vaca, R. A., Golicher, D. J., & Cayuela, L. (2011). Using climatically based random forests to downscale coarse-grained potential natural vegetation maps in tropical Mexico. *Applied Vegetation Science*, 14(3), 388–401. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2011.01132.x>
- Velázquez, A., Durán, E., Mas, J. F., Bray, D., & Gerardo, B. (2005). México ante los desafíos de desarrollo del milenio. In E. Zuñiga-Herrera (Ed.), *México ante los desafíos de desarrollo del milenio* (pp. 391–412). México, D.F.: Comisión Nacional de Población.
- Velázquez, A., García-Medina, C., Durán-Medina, E., Amador, A., & Gopar-Merino, L. F. (2016). *Standardized Hierarchical Vegetation Classification. Mexican and Global Patterns*. Switzerland: Springer.
- Zerbe, S. (1998). Potential natural vegetation: validity and applicability in landscape planning and nature conservation. *Applied Vegetation Science*, 165–172. <https://doi.org/10.2307/1478945>

Capítulo III. Relación de la lluvia de polen moderno y la vegetación en el centro de México

3.1 Resumen

Los análisis de lluvia de polen moderno son útiles para reconocer la relación polen-vegetación y tener una mejor comprensión sobre los espectros de polen en los sedimentos y en la reconstrucción de los cambios de la vegetación en el pasado. El objetivo de este artículo es caracterizar la correlación entre el polen y la vegetación en las diferentes geoformas que existen en el paisaje del centro de México.

Un total de 57 muestras de musgos y aguas superficiales fueron colectadas en diferentes tipos de vegetación y a lo largo de un gradiente altitudinal. El conjunto de datos fue analizado a través de análisis multivariado e índices ecológicos para encontrar las relaciones entre los diferentes tipos de vegetación. El análisis multivariado detectó tres tipos de vegetación: bosque templado, bosque tropical seco y matorral que se encuentran distribuidos en los diferentes relieves. En montañas y colinas, los granos de polen de *Pinus* y *Quercus* presentaron mayor grado de asociación con su vegetación correspondiente. En las llanuras, *Prosopis*, *Acacia* e *Ipomoea* mostraron una estrecha relación con el bosque tropical seco, en este mismo tipo de geoforma *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* se encontraron sobrerrepresentadas. La integración de métodos tradicionales y análisis multivariado fueron clave para una mejor comprensión sobre la relación polen-vegetación, especialmente en regiones que presentaron alta diversidad de relieves. Nuestros resultados pueden servir como base para la interpretación de futuras investigaciones paleoecológicas.

3.2 Introducción

Los análisis de polen moderno son una herramienta indispensable para la comprensión en los cambios de la vegetación y en las variaciones del clima (Islebe, Villanueva-Gutiérrez y Sánchez-Sánchez, 2001; Burry, Trivi, Palacio y Lombardo, 2001; Jantz, Homeier, León-Yáñez, Moscoso y Behling, 2013; Escarraga-Paredes, Torrescano-Valle y Islebe, 2014). Numerosos estudios han documentado la relación directa entre la lluvia de polen y los tipos de vegetación en diferentes relieves (Domínguez-Vázquez, Islebe y Villanueva-Gutiérrez, 2004; Moscol Olivera, Duivenvoorden y Hooghiemstra, 2009; López-Sáez, Glais, A., Tsiftsis, S., y Lepez, 2018), lo que ha permitido reconocer especies indicadoras de cada comunidad vegetal, las cuales son utilizadas como referencia para reconocer patrones históricos de la vegetación (Escarraga-Paredes et al., 2014).

La relación polen-vegetación es afectada por la discrepancia de la producción de polen, el proceso de floración y los medios de dispersión (Liu, Cui, Pott y Speier, 1999). Por lo tanto, la representación de la lluvia de polen difiere ampliamente en distintas altitudes y en distintos relieves, especialmente los taxa anemófilos (Ortega-Rosas, Peñalba y Guiot 2008). En las tierras altas, *Pinus* presenta asociación con su vegetación y es recurrentemente reportado con altos porcentajes de polen (Chang-Martínez y Domínguez-Vázquez, 2013). En las tierras bajas también son reportados con altos valores (Correa-Metrio, Lozano-García, Xelhuantzi-López, Sosa-Nájera y Metcalfe, 2012). Es por ello que en varias regiones los taxa anemófilos son registrados como una señal de vegetación regional (Domínguez-Vázquez et al., 2004; Lozano-García, Correa-Metrio y Luna, 2014). No obstante, algunos autores afirman que una adecuada interpretación de taxa anemófilos auxiliados de taxa entomófilos proporciona información relevante de su vegetación local (Liu et al., 1999; Gaceur et al., 2017). Sin embargo, la comprensión del polen moderno-vegetación se ha visto obstaculizada a falta de estudios que contrasten y proporcionen registros detallados en distintos tipos de geoformas o relieve.

El estudio por tipos de relieve puede ayudar a comparar, delimitar y evaluar la discrepancia del espectro de polen, esto dado que son expresados en mapas que permiten evaluar las características del ambiente (Priego-Santander, Bocco, Mendoza y Garrido, 2008).

Diversas investigaciones se han realizado sobre lluvia de polen moderno-vegetación en los trópicos (Islebe et al., 2001; Rangel-Churio, 2005b; Moscol Olivera et al., 2009; Jantz et al., 2013), en donde algunos trabajos previos se centran en describir la relación del polen con sus comunidades vegetales (Islebe et al., 2001; Escarraga-Paredes et al., 2014; Chang-Martínez y Domínguez-Vázquez, 2013), su distribución sobre el gradiente altitudinal (Ortega-Rosas et al., 2008; Lozano-García et al., 2014) y su relación con las variables climáticas (Correa-Metrio, Bush, Pérez, Schwalb y Cabrera, 2011). Otras aproximaciones han realizado comparaciones entre el polen moderno y el polen fósil para reconstruir escenarios históricos (Correa-Metrio et al., 2012). No obstante, el territorio mexicano sigue siendo un área de mayor esfuerzo de investigación debido a que ciertas regiones aún carecen de información de lluvia de polen (Chang-Martínez y Domínguez-Vázquez, 2013). La integración de métodos (métodos tradicionales y estadísticos) puede ayudar a comprender el dinamismo de la relación polen-vegetación y aplicarlas en los registros paleoecológicos (Islebe et al., 2001; Jantz et al., 2013).

Las montañas, colinas y planicies son geoformas comunes en el Centro de México. Estas geoformas o formas de relieve son el conjunto de formas o irregularidades que presenta la superficie terrestre. Las cuales se describen y tipifican utilizando índices morfométricos (los índices más comunes son la hipsometría, la amplitud de relieve, la inclinación, la orientación de la pendiente, entre otros). Las geoformas se definen en base a la diferencia que existe entre el punto de mayor y menor altitud, medida en m/km^2 (Priego-Santander et al., 2008). De acuerdo a su diferencia vertical (DV), los tipos de relieves en nuestra zona de estudio son: llanuras (DV menor a $40 m/km^2$), colinas (entre 41 a $100 m/km^2$) y montañas (mayor a $101 m/km^2$). Esta clasificación se ha utilizado para evaluar la distribución geográfica de la biodiversidad, los riesgos ambientales, los ordenamientos territoriales, las evaluaciones potenciales de actividades económicas, entre otras (Priego-Santander et al., 2008; Flores Domínguez, Priego-Santander y Ruiz-Careaga, 2015). El estudio polínico utilizando las geoformas como unidades de paisaje, es un enfoque novedoso que puede ayudar a comparar, delimitar y evaluar la diversidad del espectro de polen en los diferentes tipos de vegetación. El presente trabajo analiza la relación de la lluvia de polen moderno con la vegetación de las diferentes geoformas existentes en el Centro de México.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Área de estudio

El área se localiza en la parte norte del estado de Michoacán y la parte sur del estado de Guanajuato en el centro de México (Fig. 3.1). La temperatura media anual fluctúa alrededor de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (con excepción de la parte norte que alcanza hasta los $21\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la precipitación media anual fluctúa entre 500 mm a 1200 mm (<https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>).

Los tipos de relieve más representativos son: montañas, colinas y llanuras (Priego-Santander, Isunza-Vera, Luna-González y Pérez-Damián, 2003). En donde resalta la dominancia de las llanuras con un 57% , seguida por las colinas (33%). El bosque templado se encuentra en la zona de montaña y colinas; los géneros más representativos son: *Pinus*, *Abies*, *Alnus*, *Quercus*, *Arbutus*, *Tilia*, *Clethra*, *Buddleia* (Pérez-Calix, 1996; Molina-Paniagua y Zamudio-Ruiz, 2010). El bosque tropical seco se sitúa en las llanuras

y lomeríos-colinas; los géneros más importantes son: *Senna*, *Bursera*, *Acacia*, *Albizia*, *Cedrela*, *Ceiba*, *Conzattia*, *Euphorbia*, *Lysiloma*, *Myriocarpa*, *Prosopis*, *Crotón*, *Ipomoea*, *Randia*, *Heliocarpus* (Carranza-González, 2005; Cué-Bär, Villaseñor, Arredondo-Amezcuca, Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2006; Rzedowski y Calderon, 2013). El matorral xerófilo se ubica en las llanuras, representado por Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, *Celtis*, *Myrtillocactus*, *Agave*, *Verbesina*, *Opuntia* (Rzedowski y Calderon, 1987).

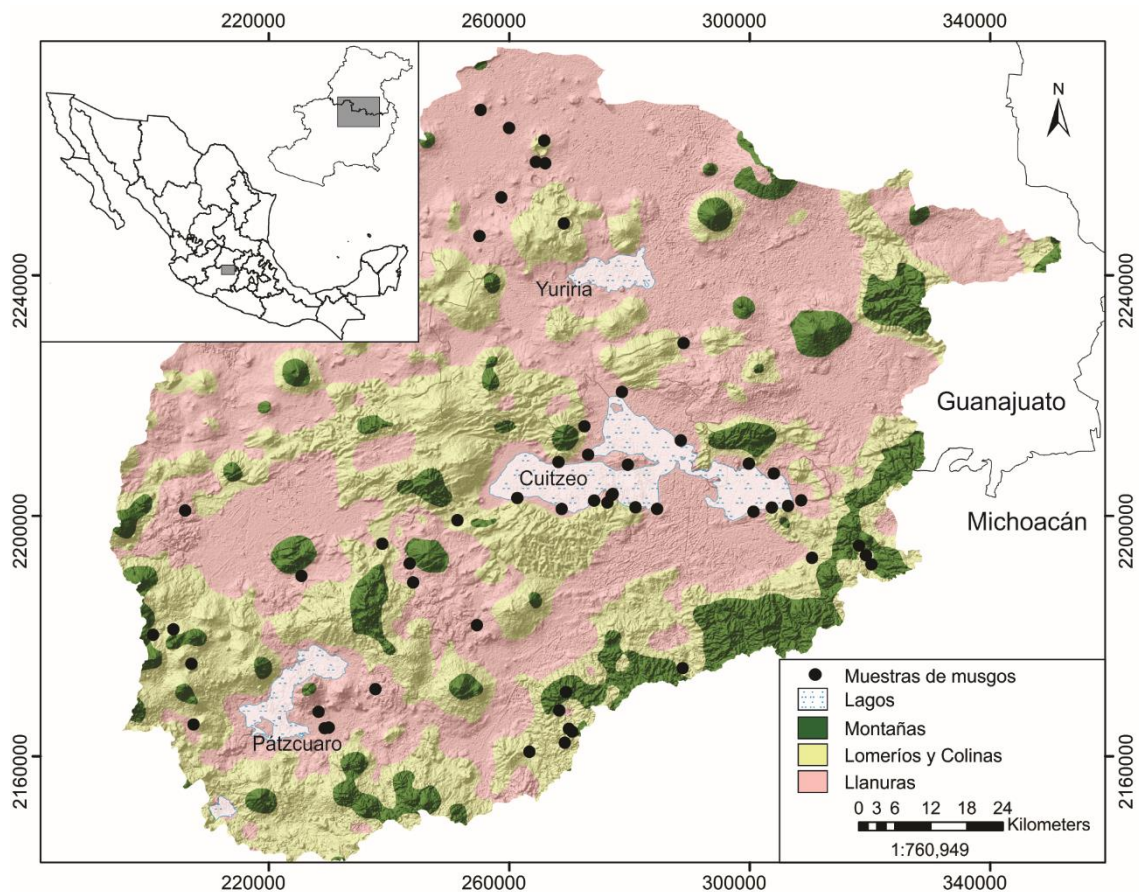


Figura 3. 1 Ubicación de los sitios de muestreo en el centro de México. Los tipos de relieve dominantes a nivel regional de acuerdo con Priego-Santander et al. (2003)

3.3.2 Análisis de polen moderno

Se recolectaron 38 muestras de musgo y 19 de muestras de agua superficial (50 ml) del lago de Cuitzeo, donde no se encontró musgo. Para un total de 57 muestras superficiales (Tabla 3.1). Las muestras fueron recolectadas siguiendo los tipos de relieve y los tipos de

vegetación durante el periodo 2013-2017. Los granos de polen moderno fueron extraídos utilizando la técnica de acetólisis (Erdtman, 1952); los taxa extraídos se montaron en laminillas y fueron fijados con glicerina; las laminillas se analizaron con un Microscopio Olympus CH30, con un aumento de 400X, hasta contar con un mínimo de 300 granos de taxa leñoso. Todos los taxa de polen fueron identificados utilizando la colección de referencia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y diversos atlas palinológicos (Lozano-García y Martínez-Hernández, 1990; Palacios-Chávez, Ludlow-Wiechers y Villanueva, 1991; Raygadas-Torres, 2011).

El diagrama de polen se realizó mediante el software Tilia y Tilia Graph; la zonación del diagrama se realizó mediante la suma de cuadrados por conglomerados “Coniss” (Grimm, 2011); los granos de polen fueron agrupados de acuerdo a las características ecológicas de las regiones bosque templado, bosque tropical seco y matorral, para esta clasificación se siguieron los criterios descritos por Carranza-González (2005) y Domínguez-Vázquez, Osuna-Vallejo, Castro-López, Israde-Alcántara y Bischoff (2019).

Tabla 3.1 Ubicación geográfica de las muestras de polen moderno

Muestra	Altitud (m)	Descripción de Sp.	Vegetación potencial	Relieve
1	1680	<i>Opuntia, Acacia, Ipomoea, Albizia, Randia, Lysiloma, Forestiera</i>	Bosque tropical seco	Llanura
2	1720	<i>Acacia</i>	Bosque tropical seco	Llanura
3	1720	<i>Ipomoea, Albizia, Mytillocactus, Lysiloma, Bursera, Ceiba</i>	Bosque tropical seco	Llanura
4	1760	<i>Prosopis</i>	Bosque tropical seco	Llanura
5	1760	<i>Herliocarpus, Opuntia, Eysenhardtia, Randia, Lysiloma, Bursea</i>	Bosque tropical seco	Llanura
6	1840	Lago	Lago	Llanura
7	1840	Lago	Lago	Llanura
8	1840	Lago	Lago	Llanura
9	1840	Lago	Lago	Llanura
10	1840	Lago	Lago	Llanura
11	1840	Lago	Lago	Llanura
12	1840	Lago	Lago	Llanura
13	1840	Lago	Lago	Llanura
14	1850	<i>Acacia, Ipomoea, Opuntia</i>	Bosque tropical seco	Llanura
15	1850	Lago	Lago	Llanura
16	1850	Lago	Lago	Llanura
17	1850	Lago	Lago	Llanura

18	1850	Lago	Lago	Llanura
19	1860	Lago	Lago	Llanura
20	1860	<i>Heliocarpus, Opuntia, Ipomoeae, Eysenhardtia, Condalia, Albizia, Lysiloma, Ceiba</i>	Bosque tropical seco	Llanura
21	1860	Lago	Lago	Llanura
22	1870	<i>Acacia, Opuntia, Ipomea, Schinus, Asteraceae</i>	Bosque tropical seco	Lomerío-Colina
23	1870	<i>Acacia, Ipomea, Eysenhardtia</i>	Matorral tropical seco	Llanura
24	1880	<i>Pinus, Quercus</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
25	1890	<i>Euphorbia, Acacia, Ipomoea, Zanthoxylum, Stenocereus, Myrtillocactus</i>	Bosque tropical seco	Llanura
26	1900	<i>Acacia, Ipomea, Lysiloma</i>	Bosque tropical seco	Lomerío-Colina
27	1910	<i>Acacia, Ipomea, Opuntia, Nicotiana, Schinus</i>	Bosque tropical seco	Llanura
28	1915	Sin vegetación	Matorral tropical seco	Lomerío-Lomerío-Colina
29	1920	<i>Heliocarpus, Acacia, Ipomoea, Eysenhardtia, Albizia, Randia, Lysiloma, Bursera</i>	Bosque tropical seco	Lomerío-Colina
30	1950	<i>Ipomea, Opuntia, Tectona, Asteraceae, Poaceae, Sida, Lepechinia</i>	Matorral tropical seco	Lomerío-Colina
31	1950	No vegetación	Matorral tropical seco	Colina
32	2040	Compositae, Poaceae, <i>Acacia, Opuntia</i>	Bosque de pino-encino	Llanura
33	2040	<i>Pinus, Quercus, Crataegus, Asteraceae, Acacia, Poaceae, Salvia, Baccharis, Garrya, Croton, Buddleja</i>	Bosque de pino-encino	Colina
34	2065	<i>Fraxinus, Quercus</i>	Bosque de pino-encino	Llanura
35	2070	<i>Acacia, Pinus, Quercus</i>	Bosque de pino-encino	Llanura
36	2100	<i>Asteraceae, Quercus, Opuntia, Fraxinus, Acacia</i>	Bosque de pino-encino	Llanura
37	2140	<i>Acacia, Casimiroa, Buddleja, Ipomea, Opuntia, Baccharis</i>	Bosque de pino-encino	Llanura
38	2210	<i>Pinus, Quercus, Acacia, Arbutus, Garrya, Croton, Fabaceae, Wigandia, Eupatorium</i>	Bosque tropical seco	Llanura
39	2216	<i>Eysenhardtia, Ipomoea, Bursera</i>	Bosque tropical seco	Llanura
40	2220	<i>Pinus, Quercus</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
41	2220	<i>Acacia, Fraxinus</i>	Bosque de pino-encino	Llanura
42	2220	Poaceae	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina

43	2220	<i>Baccharis, Acacia, Poaceae, Asteraceae</i>	Bosque de pino	Llanura
44	2260	<i>Pinus, Quercus, Arbutus, Baccharis, Cosmos</i>	Bosque de pino-encino	Montaña
45	2280	<i>Acacia, Ipomea</i>	Bosque tropical seco	Lomerío-Colina
46	2290	<i>Pinus, Quercus, Theaceae, Poaceae, Asteraceae</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
47	2290	<i>Pinus, Quercus, Fraxinus Ternstroemia, Crataegus, Ericaceae, Theaceae</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
48	2290	<i>Quercus, Fraxinus, Baccharis, Forestiera, Crataegus</i>	Bosque de pino-encino	Montaña
49	2290	<i>Quercus, Crataegus, Baccharis, Forestiera, Acacia, Ipomea</i>	Bosque de pino-encino	Montaña
50	2370	<i>Pinus, Arbutus, Quercus, Alnus, Poaceae, Asteraceae, Baccharis</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
51	2380	<i>Pinus, Quercus, Fraxinus, Ericaceae, Poaceae, Asteraceae, Salvia, Baccharis, Ternstroemia</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
52	2380	<i>Baccharis, Asteraceae, Labiatae</i>	Bosque de pino	Lomerío-Colina
53	2460	<i>Pinus, Quercus, Fraxinus, Ternstroemia, Ericaceae</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
54	2510	<i>Pinus, Quercus, Alnus, Salvia, Baccharis, Labiatae</i>	Bosque de pino-encino	Montaña
55	2690	<i>Pinus, Alnus, Quercus, Crataegus, Asteraceae, Poaceae, Chenopodiaceae</i>	Bosque de pino	Lomerío-Colina
56	2700	<i>Pinus, Quercus, Arbutus, Crataegus, Asteraceae, Arbutus</i>	Bosque de pino-encino	Lomerío-Colina
57	2740	<i>Pinus, Quercus, Crataegus, Baccharis, Asteraceae, Poaceae</i>	Bosque de pino	Lomerío-Colina

3.3.3 Índice de Diversidad

Se realizaron dos índices ecológicos utilizando el software PAST 3.26 (Hammer, 2001), con la intención de estimar la diversidad y dominancia de los taxa de polen para todos los sitios. Los índices que se utilizaron fueron: dominancia de Simpson y el índice de Diversidad de Shannon. Los sitios fueron ordenados de acuerdo a la descripción de las especies de vegetación partiendo desde los bosques templados hasta los matorrales. Los índices se expresan como:

Índice de dominancia de Simpson

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{n}\right)^2$$

Donde s es el número de taxa, n es el número total de individuos y n_i es el número de individuos del taxón i . Los rangos van de 0 a 1, 0 indica que todos los taxa están igualmente representado y 1 un taxón domina completamente la comunidad.

Índice de diversidad de Shannon

$$H = - \sum_i \frac{n_i}{n} \ln \frac{n_i}{n}$$

Los valores varían de 0 para las comunidades con un solo taxón a valores altos para comunidades con muchos taxones, cada uno con pocos individuos.

3.3.4 Análisis de la vegetación

El análisis de vegetación de los sitios de muestreos fue realizado a lo largo del gradiente altitudinal (1,700 msnm a 3,000 msnm). Estableciendo parcelas en sitios boscosos, matorrales y sitios abiertos. Para los sitios boscosos se realizaron cuadrantes de 20 x 20 m en los mismos puntos en donde se tomaron las muestras de musgos, registrándose todos los árboles que presentaron ≥ 5 cm de DAP (Diámetro a la Altura del Pecho). Para los sitios abiertos solo se realizó una breve descripción de las especies dominantes con su porcentaje de cobertura. Las plantas colectadas fueron identificadas en la UMSNH. Las plantas colectadas se almacenaron en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para completar la serie de datos se tomó información de Medina-García (2016) para completar las descripciones de las asociaciones vegetales con las condiciones climáticas.

3.3.5 Análisis multivariado

El mapa de pendiente del terreno se desarrolló en ArcGis 10.3 utilizando un modelo digital de elevación. Las pendientes se clasificaron de acuerdo a Bocco, Priego y Cotler (2005). La lluvia de polen y las pendientes se analizaron mediante el Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) utilizando el Software PC-ORD 5 (McCune y Mefford, 2006). Se utilizaron los taxa de polen, con valores mayores a 5%. La intención

fue integrar a los taxa locales, dado que son de polinización entomófila, los cuales producen poco polen. NMDS evita el requisito de normalidad de los datos, y la suposición de un modelo de respuesta unimodal o de respuesta lineal (Broothaerts et al., 2018). NMDS es una técnica robusta y efectiva en ecología (Minchin, 1987), la cual ha proporcionado una visión completa para relacionar las señales de polen con las variables ambientales (Broothaerts et al., 2018). La distancia media de la ordenación fue calculada por la distancia de Sorensen, la cual, conserva la sensibilidad del conjunto de datos heterogéneos y otorga menos peso a los valores atípicos (McCune y Mefford, 2006).

3.3.6 Análisis de la relación del polen y la cobertura de vegetación

Para establecer la relación entre la presencia del polen en las muestras y la vegetación se calcularon índices de asociación (A), sobre-representación (O) y sub-representación (U) (Davis y Goodlett, 1960):

$$\begin{aligned}
 U &= P_1 / (P_1 + B_0) \\
 O &= P_0 / (P_0 + B_0) \\
 A &= B_0 / (P_0 + P_1 + B_0)
 \end{aligned}$$

P_1 es el número de levantamientos en las parcelas donde se encuentra el taxón en la vegetación, pero ausente su polen. B_0 es el número de levantamiento en dónde se encuentra el taxón tanto en la vegetación como en el polen. P_0 es el número de levantamiento en donde se encuentra el polen, pero ausente en la vegetación. Para el caso del índice **A** los valores varían entre 0 y 1, siendo **A** = 1, el taxón de polen y la planta están fuertemente asociados. **A**= 0, el polen o la planta no se encuentra asociados.

3.4 Resultados

3.4.1 Análisis de diversidad

Los sitios más diversos fueron los bosques tropicales secos ($H' = 2.5$), seguido por los sitios de bosque templado (Fig. 3.2a). Sin embargo, éste último presentó un sitio con un de valor $H' = 2.7$. Los sitios de matorral fueron los menos diversos. (Fig. 3.2b). La mayor dominancia se encontró en los matorrales. Mientras que los bosques tropicales secos presentaron valores de dominancia bajos.

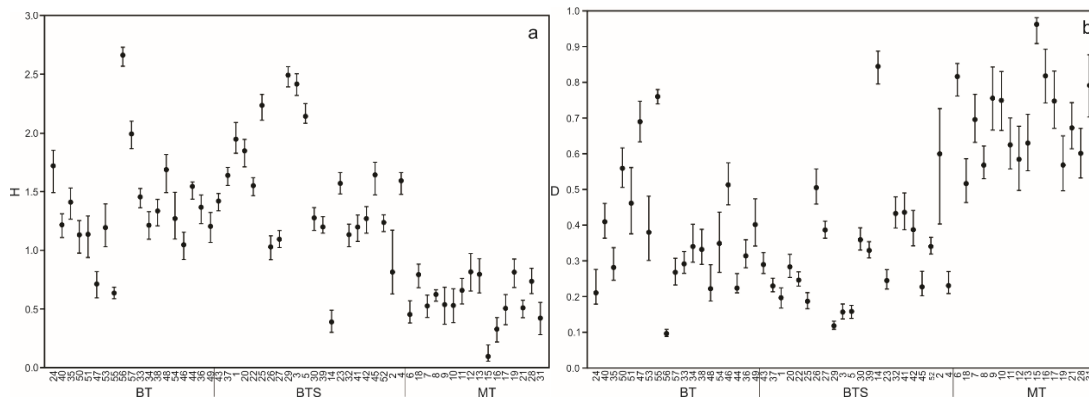


Figura 3. 2 Diagrama de índices de diversidad de los espectros polínicos

3.4.2 Análisis de lluvia de polen moderno

Los tres principales tipos de vegetación que se representa en la zona de estudio son el bosque templado representado por *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*, el bosque tropical seco caracterizado por *Ceiba*, *Acacia*, Solanaceae, *Ipomoea*, Myricaceae, entre otras y el matorral subtropical por Asteraceae, Poaceae, Euphorbiaceae, Cyperaceae, entre otras.

El análisis de CONISS distinguió dos grandes grupos: una vegetación dominada por polen arbóreo y otra dominada por polen no arbóreo (Fig. 3.3).

La zona IIIb está asociada a un bosque templado. Con *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* dominando esta zona. *Pinus* osciló entre 15 y 60%. *Quercus* mostró un pico de 29% en la muestra número 54, pero en el resto de la zona fluctuó alrededor de 10%, observándose las mismas tendencias en *Alnus*.

La Zona IIIa muestra la presencia de un bosque templado dominada por *Pinus* (80%). Mientras que *Quercus* y *Alnus* presentaron porcentajes inferiores a 15%. Poaceae y Asteraceae fluctuaron entre 5 y 40%.

La Zona IIb es caracterizada por un bosque templado acompañado con elementos secundarios. El valor más alto de *Pinus* fue de 60% (muestra 42). Los valores de *Quercus* y *Alnus* fueron inferiores a 20%. Asteraceae y Poaceae fluctuaron de 10 a 60%. Asimismo, se observó la presencia de Cyperaceae y Chenopodiaceae en toda la zona.

La Zona IIa presentó taxa polínico asociado a una zona de transición, por lo que se encontraron taxa templados y tropicales. Los taxa dominantes característicos del matorral fueron: Poaceae, Asteraceae, con proporciones menores de Cyperaceae, Chenopodiaceae.

Amaranthaceae, Euphorbiaceae y Rubiaceae. Los elementos del bosque seco como: Myricaceae, *Acacia*, *Ipomoea*, Fabaceae, Solanaceae, *Ceiba*, Mimosoideae y *Croton*, presentaron bajas porcentajes. El valor máximo de *Pinus* fue de 50% y *Quercus* de 15%. La Zona Ib indica la dominancia de un matorral. A partir de esta zona los valores de *Pinus* es muy bajo, *Quercus* y *Alnus* no aparecen en esta zona. Polen no arbóreo domina la zona Poaceae (98%), Asteraceae osciló alrededor de 20%, con excepción en la muestra 14 que alcanzó 90%. *Acacia* mostró dos máximos importantes alrededor de 30% (muestras 12 y 18).

La Zona Ia muestra la presencia de un bosque tropical seco acompañado por elementos de matorral. Los taxa tropicales secos dominantes fueron: *Prosopis* Ulmaceae y *Croton*. Otros taxa tropicales que se observaron son: Myricaceae, Fabaceae, *Ceiba*, *Ipomoea* y Solanaceae, pero con bajas proporciones. Poaceae y Asteraceae también se aprecian con valores que no pasan el 30%, únicamente en la muestra 2, Poaceae alcanza el 70%, las demás muestras nunca pasan de 25%.

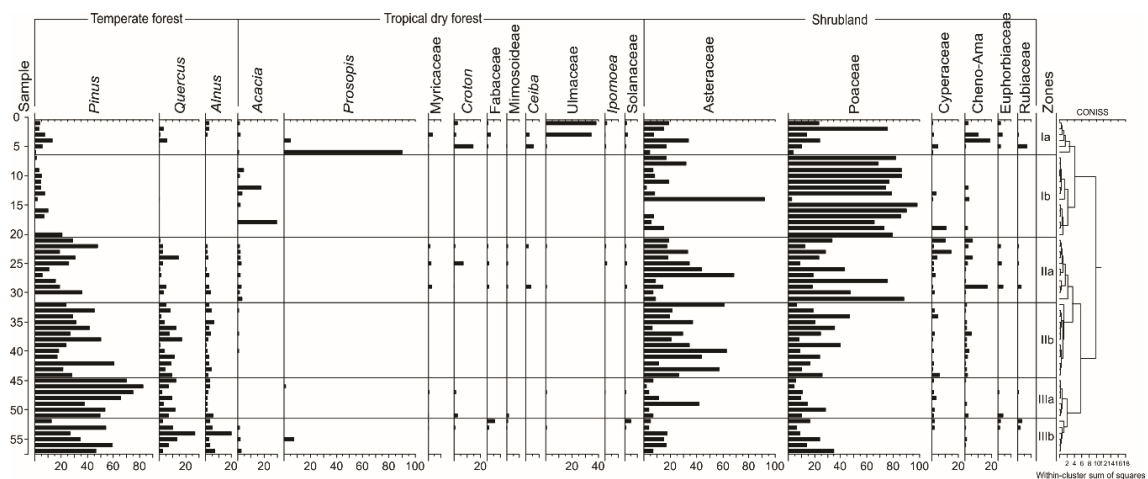


Figura 3. 3 Diagrama de polen moderno en porcentajes (El polen se ordenó respecto a sus tipos de vegetación)

3.4.3 Análisis multivariado

El NMDS produjo un valor de tensión (Stress) de 16.13 para las dos dimensiones, la cual es satisfactorio para comprender el comportamiento del conjunto de datos (Kruskal, 1964; McCune y Grace, 2002; Broothaerts et al., 2018).

En el eje uno negativo agrupó polen arbóreo y con valor positivo concentró polen no arbóreo. Para el eje dos expresó un gradiente de humedad (Fig. 3.4). En el eje uno negativo agrupó taxa templados como: *Pinus*, *Quercus*, *Alnus* y *Typha*, los cuales presentaron relaciones pendientes de 5 a 10°, con las montañas y con las colinas. Con valores positivos se concentraron los taxa no arbóreo, taxa de matorral, como: Poaceae, *Croton*, Asteraceae, Cyperaceae y Cheno-Amaranthaceae, los cuales mostraron correlaciones con las pendientes de 1 a 3° de inclinación y con las llanuras. En el eje dos positivo se agruparon taxa tropicales secos como: *Ipomoea*, Rubiaceae, Euphorbiaceae, *Celtis*, Fabaceae, entre otros, los taxa mostraron estrecha relación con las pendientes de 3-5°, colinas y llanuras.

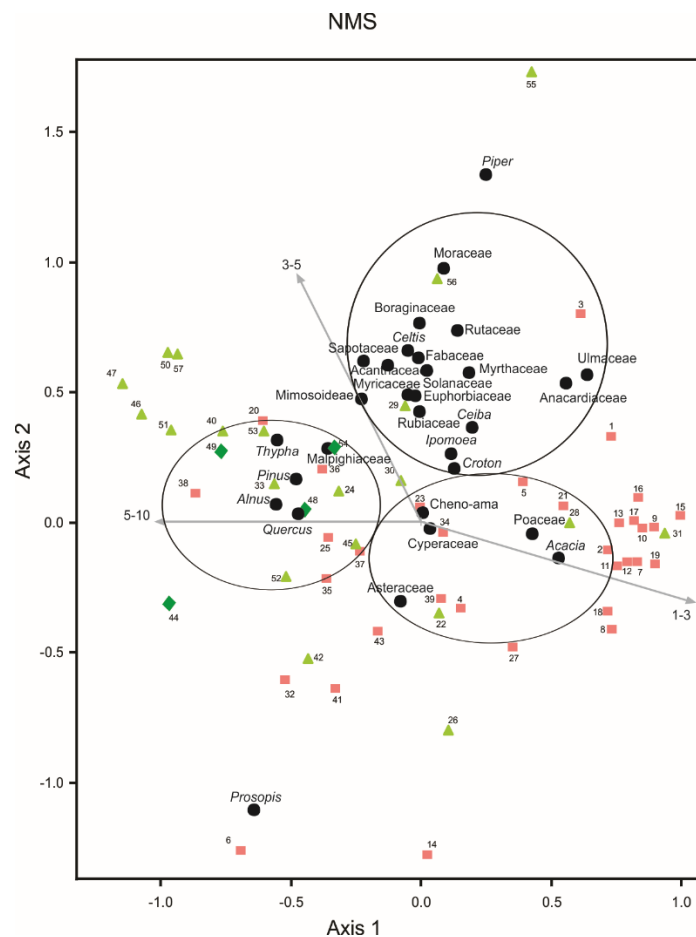


Figura 3. 4 Ordenación de la lluvia de polen (■) muestras de llanuras, (▲) muestras de colinas y (◆) muestras de montañas. Las pendientes se indican por su ángulo de inclinación.

3.4.4 Análisis de relación de la lluvia de polen moderno y su cobertura de vegetación

Para las montañas y colinas, los taxa de *Pinus* y *Quercus* presentaron asociación positiva entre la vegetación y el polen (0.86 y 1). Aunque, *Quercus* se encontró subrepresentado

con respecto a su cobertura de vegetación (Tabla 3.2). Taxa del bosque tropical seco como *Croton* y *Acacia* se observaron subrepresentadas y no operan como polen alóctono. Elementos de matorral como: Asteraceae, Cheno-Amaranthaceae, *Alnus*, Cyperaceae, *Prosopis*, entre otros, estuvieron sobrerrepresentados. Asteraceae y Poaceae presentaron alta dispersión fuera de los sitios (Tabla 3.2). En las llanuras, los taxa tropicales secos: *Ipomoea*, *Prosopis* y *Acacia* presentaron una fuerte asociación con su vegetación (0.83, 1 y 0.67 respectivamente). Por el contrario, los taxa templados mostraron alta sobrerrepresentación de: *Pinus*, *Alnus*, *Quercus* en los sitios de planicie donde la vegetación dominante es el bosque tropical seco. Taxa tropicales como: Euphorbiaceae, *Ceiba*, Cyperaceae, Cheno-Amaranthaceae también indican sobrerrepresentación. Sin embargo, estos taxa se dispersan ligeramente fuera de los sitios de colecta. *Celtis*, Rutaceae, Boraginaceae y *Bursera* se encontraron sub-representados (0.80, 1, 1, 0.80).

Tabla 3. 2. Índices de relación polen-vegetación. La tabla muestra dos unidades de relieve. a) Zona de montaña y colina y b) Zona de llanura. Para la A = asociación, O = sobrerrepresentación, U = subrepresentación

Zona de montaña y colina				Zona de llanura		
Pollen taxa	U	O	A	U	O	A
<i>Pinus</i>	0	0.14	0.86	0	1	0
<i>Alnus</i>	0	0.79	0.21	0	1	0
<i>Quercus</i>	0	0	1	0	1	0
Asteraceae	0	0.43	0.57	0	0.71	0.29
<i>Ipomoea</i>	0	1	0	0.17	0	0.83
<i>Acacia</i>	0.50	0.75	0.20	0	0.33	0.67
Poaceae	0	0.38	0.62	0	0	1
Cheno-Ama	0	0.75	0.25	0	0.83	0.17
Cyperaceae	0	1	0	0	0.86	0.14
<i>Prosopis</i>	0	1	0	0	0	1
<i>Croton</i>	1	1	0	0	1	0
<i>Ficus</i>	0	1	0			
Moraceae	0	1	0			
<i>Piper</i>	0	1	0			
Mimosoideae	0	1	0	0	1	0
Euphorbiaceae	0	1	0	0	0.83	0.17
Solanaceae	0	1	0	0	1	0
Rutaceae	0	1	0	1	1	0
Myricaceae	0	1	0	0	1	0
Fabaceae	0	1	0	0	1	0
Malpighiaceae	0	1	0	0	1	0
Myrtaceae	0	1	0	0	1	0

Sapotaceae	0	1	0	0	1	0
Acanthaceae	0	1	0	0	1	0
Moraceae	0	1	0			
<i>Typha</i>	0	1	0	0	1	0
Rubiaceae	0	1	0	0	1	0
<i>Wigandia</i>	0	1	0			
<i>Celtis</i>	0	1	0	0.80	0	0.20
Ulmaceae	0	1	0	0	1	0
<i>Eysenhardtia</i>	0	1	0			
Brassicaceae	0	1	0			
Boraginaceae	0	1	0	1	1	0
<i>Ceiba</i>				0	0.75	0.25
Anacardiaceae				0	1	0
<i>Taxodium</i>				0	1	0
Cucurbitaceae				0	1	0
<i>Bursera</i>				0.80	0	0.20
Apocynaceae				0	1	0
Meliaceae				0	1	0

3.5 Discusión

Los procesos tectónicos y vulcanológicos han ocasionado alta heterogeneidad en los relieves del Centro de México (Israde-Alcántara et al., 2005). El análisis polínico permitió diferenciar la relación entre la lluvia de polen moderno y la vegetación en las diferentes geoformas. El análisis multivariado de los taxa de polen separó de manera natural tres tipos de vegetación: bosque templado, bosque tropical seco y matorral (Domínguez-Vázquez et al., 2004). Los taxa de bosque templado estuvieron representadas por: *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*. Estos taxa presentaron relación con los sitios de montañas, colinas y con pendientes entre 5 a 10° de inclinación. Los taxa de bosque tropical se caracterizaron por: *Ceiba*, Fabaceae, Rubiaceae, *Celtis*, entre otros, los cuales tuvieron correlaciones con los sitios de colinas y con pendientes entre 3 a 5°. Los taxa de matorral por: Poaceae, Asteraceae, Chenopodiaceae y Cyperaceae, los cuales presentaron relación con los sitios de llanuras y con pendientes entre 1 y 3°. Por otro lado, el análisis de diversidad mostró que los sitios de bosque tropical seco fueron los más diversos y presentaron misma equidad entre los taxa de polen, esta diversidad disminuye gradualmente en los sitios de bosque templado y los sitios de matorral (Gallardo-Cruz, Meave y Pérez-García, 2005; Zacarias-Eslava et al., 2011). Esta baja diversidad en los sitios de matorral se explica porque presenta una alta dominancia de taxa de Asteraceae y Poaceae. Asimismo, el análisis polínico permitió describir la vegetación potencial, especialmente en aquellas áreas que carecen de cubierta de vegetación original (Islebe et al., 2001; Chang-Martínez

y Domínguez-Vázquez, 2013; Escarraga-Paredes et al., 2014; Correa-Metrio et al., 2012). A pesar de que el área de estudio ha sufrido durante el todo el Holoceno tardío un alto grado de transformación (Domínguez-Vázquez et al., 2019). Los índices de diversidad mostraron ser una herramienta eficiente para conocer la diversidad de las comunidades vegetales en el paisaje. Sin embargo, los cambios actuales en el uso del suelo han afectado la composición de los bosques provocando una pérdida de diversidad, favoreciendo la dominancia de especies secundarias como: Poaceae y Asteraceae (Carcaillet, Richard, Bergeron, Fréchette y Ali, 2010; Domínguez-Vázquez et al., 2019).

3.5.1 Zona de montañas

La zona estuvo dominada por taxa templados como: *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*, los cuales presentaron una estrecha relación con la vegetación local. La abundancia de taxa templados dentro de la señal polínica, está relacionada con la presencia de bosques de pino-encino y bosques de pino, comúnmente distribuidas en montañas y colinas (Rzedowski, 2006). Esta vegetación está asociada con los isobioclimas tropical pluviestacional supratropical húmedo y tropical pluviestacional mesotropical húmedo, que se encuentran distribuidos arriba de los 2400 msnm (Castro López y Velázquez, 2019). Los taxa de matorrales se encontraron presentes en la zona indicando algún grado de disturbio (Chang-Martínez y Domínguez-Vázquez, 2013).

Dentro de la zona de montañas, el polen de *Pinus* presentó sus mayores porcentajes alcanzando en algunos lugares hasta 60%, pero su representación fue baja para los sitios 52 y 54, donde solo contribuyeron con el 25% del total (Gaceur et al., 2017). Estas mismas tendencias se manifiestan en *Quercus* y *Alnus*, excepto en la muestra 44 en donde los valores fueron los más altos de todo el diagrama (aproximadamente 30%). Estos bajos porcentajes de polen presentes en las tierras altas pueden deberse a factores fisiográficos que impiden la distribución y la deposición de polen en los sitios. El primero, la diversidad topográfica impone límites y funcionan como barreras naturales en la dispersión de los taxa (Lozano-García et al., 2014). La segunda, la dirección de los vientos dominantes en la zona puede estar transportando a los granos de polen anemófilos a otras direcciones (Jantz et al., 2013).

3.5.2 Zona de colinas

Las colinas, se caracterizan por bosques de pino-encino (Pérez-Cálix, 1999) con una señal polínica asociada a *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* (Domínguez-Vázquez et al, 2004). Este tipo de vegetación presenta una mayor distribución en relieves accidentados (Rzedowski, 2006). Los altos valores de polen indican que la señal procede de bosques de pino-encino que se encuentran establecidos en condiciones de humedad, que corresponden al isobioclima tropical pluviestacional mesotropical húmedo (Castro López y Velázquez, 2019).

El polen de *Pinus* mostró una fuerte asociación con la vegetación local presentes en las colinas (Chang-Martínez y Domínguez-Vázquez, 2013; Correa-Metrio et al., 2012). Los porcentajes de *Pinus* son más altos cuando se encuentran próximos a su vegetación parental, pero disminuyen, cuando se incrementa la distancia a su zona de producción (Liu et al., 1999; Ortega-Rosas et al., 2008; Gaceur et al., 2017), llegando sus proporciones a descender a menos de 5% en algunos sitios en la zona de estudio. Los altos valores de polen de *Pinus* presentes en colinas, que en algunos casos fueron más altos, que los sitios localizados en la zona de montañas, se debe a que son sitios intermedios entre las montañas y las llanuras. Por lo tanto, su proporción polínica está asociada tanto a la producción de polen del bosque local, como al transporte anemófilo procedente de los bosques de pino-encino que se encuentran en altitudes superiores en la zona de montañas (Moscol Olivera et al., 2009; Jantz et al., 2013; Lozano-García et al., 2014).

El taxón de *Quercus* presentó alta asociación con su vegetación. A pesar de eso, sus porcentajes en las tierras altas sólo alcanzaron hasta un 25%. A menudo estos valores se asocian a su vegetación local con condiciones subhúmedas a secas (Israde-Alcántara et al., 2010; Domínguez-Vázquez et al., 2019). Por otro lado, *Alnus* no presentó relación clara con su cobertura de vegetación. Las condiciones de humedad favorecen su distribución en montañas, colinas y al borde de ríos (Castro López y Velázquez, 2019). Lozano-García et al. (2014) reportan que el *Alnus* presenta los valores más altos por encima del límite de la línea arbolada. Por último, Asteraceae y Poaceae muestra una estrecha relación con la perturbación del lugar. Debido a que estos taxa son generalmente reportados en todo tipo de vegetación y con diferente grado de disturbio (Moscol Olivera et al., 2009; Jantz et al., 2013; Li et al., 2019).

3.5.3 Zona de llanuras

El bosque tropical seco se caracterizó por los siguientes taxa: Myricaceae, *Croton*, Fabaceae, *Ceiba*, *Acacia*, *Celtis*. Este bosque se encuentra frecuentemente por debajo de los 2,000 m.s.n.m. y está relacionado con pendientes suaves. Si bien, también es común localizarlo en diferentes tipos de relieves (Rzedowski, 2006). Castro López y Velázquez (2019) argumentan que este bosque presenta amplia distribución y se relaciona con los isobioclimas tropical xérico termotropical seco y en tropical xérico mesotropical seco.

Ipomoea, *Acacia* y *Prosopis* mostraron asociación con su vegetación parental, indicando condiciones locales (Bell y Fletcher, 2016). Para el Valle de México, Lozano-García et al. (2014) reportan que *Acacia* presenta una dispersión estrecha en relación con su vegetación local. No obstante, la mayoría de los taxa tropicales secos se encontraron sobrerrepresentadas (Domínguez-Vázquez et al., 2004). La sobrerrepresentación de taxa tropicales podría deberse a dos factores: el primero es que los polinizadores están aportando información de áreas próximas a los sitios de colecta (Liu, 1999) y el segundo es porque los taxa tropicales secos habrían sido depositados en los musgos antes de la degradación de los bosques y guardaron el registro polínico a través del tiempo (Domínguez-Vázquez et al., 2004). Esta degradación de los bosques ha provocado que gran parte de la zona presente ausencia de una vegetación arbórea, la cual favorecen la alta dispersión de taxa anemófilo (Li et al., 2019). Por consiguiente, *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* se encuentran sobrerrepresentados, principalmente alrededor del lago de Cuitzeo.

Actualmente, los bosques de pino están restringidos en las partes altas (Rzedowski y Calderon, 1987). El bosque de encino aún se puede encontrar en pequeños remanentes con condiciones favorables de microclimas (Castro López y Velázquez, 2019). Los elementos de *Alnus* se localizan al borde de los ríos y al borde de los lagos (Rzedowski y Calderon, 1989). Los taxa de matorral estuvieron muy presentes en esta zona. El polen de Cucurbitaceae se encontró sobrerrepresentada, sin embargo, las intensas actividades agrícolas cercanas a los sitios de levantamientos de las muestras de musgos están contribuyendo a la aparición del taxón en el espectro polínico. De la misma manera, la presencia esporádica de Chenopodiaceae, Euphorbiaceae, Cyperaceae están asociados a condiciones lacustres y pantanosas que se encuentran próximos a los levantamientos alrededor del lago (Israde-Alcántara et al., 2010). Las altas frecuencias de Poaceae y Asteraceae están asociadas a los disturbios locales derivados de las actividades agrícolas y pecuarias que se desarrollan en las llanuras (Carranza-González, 2005). Estas

actividades han provocado la conversión de bosques y en un empobrecimiento del suelo, causando una sucesión arrestada que ha favoreciendo a la presencia extensiva del matorral subtropical en la zona de estudio (Domínguez-Vázquez et al., 2019).

3.6 Conclusiones

El análisis palinológico permitió diferenciar el comportamiento del espectro polínico en tres tipos de relieves (montañas, colinas y llanuras). El análisis también permitió identificar tres tipos de vegetación: bosque templado, bosque tropical seco y matorral. En montañas y en colinas se agruparon taxa templado como: *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*. Los taxa templados muestran relación con el bosque de bosque templado caracterizado por *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*. Las llanuras estuvieron representadas por taxa del bosque tropical seco como: Euphorbiaceae, *Celtis*, Fabaceae, *Ceiba*, entre otros, los cuales presentaron relación con pendientes menores a 5°. *Prosopis*, *Ipomoea* y *Acacia* mostraron relación positiva con la vegetación. Los taxa de bosques tropicales secos fueron los más diversos, seguido por los taxa de los bosques templados y por los matorrales. La presente investigación puede ser útil para futuras investigaciones paleoecológicas. Especialmente, auxiliar en la interpretación de las reconstrucciones espaciales a escala regional.

3.7 Bibliografías

- Bocco, G., Priego, A., y Cotler, H. (2005). La geografía física y el ordenamiento ecológico del territorio. Experiencias en México. *Gaceta Ecológica* 76, 23–34.
- Bell, B. A., y Fletcher, W. J. (2016). Modern surface pollen assemblages from the Middle and High Atlas, Morocco: insights into pollen representation and transport. *Grana*, 55(4), 286–301. <https://doi.org/10.1080/00173134.2015.1108996>
- Burru, L. S. Trivi, M. E., Palacio, P. I., y Lombardo, M. C. (2001). Relaciones polen-vegetación de algunos taxa de la estepa patagónica (Argentina). *Revista Chilena de Historia Natural*, 74, 419–196
- Broothaerts, N., Robles-López, S., Abel-Schaad, D., Pérez-Díaz, S., Alba-Sánchez, F., Luelmo-Lautenschlaeger, R., ... López-Sáez, J. A. (2018). Reconstructing past

arboreal cover based on modern and fossil pollen data: A statistical approach for the Gredos Range (Central Spain). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 255, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.04.007>

Carcaillet, C., Richard, P. J. H., Bergeron Y, Fréchette, B. y Ali, A. A. (2010). Resilience of the boreal forest in response to Holocene fire-frequency changes assessed by pollen diversity and population dynamics. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 1026–1039.

Cué-Bär, E. M., Villaseñor, J. L., Arredondo-Amezcuca, L., Cornejo-Tenorio, G., y Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín La Sociedad Botánica México*, (78), 47–81.

Correa-Metrio, A., Bush, M. B., Pérez, L., Schwalb, A., y Cabrera, K. R. (2011). Pollen distribution along climatic and biogeographic gradients in northern Central America. *Holocene*, 21(4), 681–692. <https://doi.org/10.1177/0959683610391321>

Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Xelhuantzi-López, S., Sosa-Nájera, S., y Metcalfe, S. E. (2012). Vegetation in western Central Mexico during the last 50 000 years: modern analogs and climate in the Zacapu Basin. *Journal of Quaternary Science*, 27(5), 509–518. <https://doi.org/10.1002/jqs.2540>

Chang-Martínez, L., y Domínguez-Vázquez, G. (2013). Distribución espacial del polen en un gradiente altitudinal en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 876–883. <https://doi.org/10.7550/rmb.32417>

Carranza-González, E. (2005). Conocimiento actual de la flora y la diversidad vegetal del estado de Guanajuato, México. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo Complementario XXI*. 1-18.

Castro López, V., y Velázquez, A. (2019). Reconstruction of native vegetation based upon integrated landscape approaches. *Biodiversity and Conservation*, 28(2), 315–327. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1655-2>

Davis, M. B., y Goodlett J. C. (1960). Comparison of the present vegetation with pollen-spectra in surface samples from Brownington pond, Vermont. *Ecology*, 41: 346-357

- Domínguez-Vázquez, G., Islebe, G. A., y Villanueva-Gutiérrez, R. (2004). Modern pollen deposition in Lacandon forest, Chiapas, Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 131(1–2), 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.03.004>
- Domínguez-Vázquez, G., Osuna-Vallejo, V., Castro-López, V., Israde-Alcántara, I., y Bischoff, J. A. (2019). Changes in vegetation structure during the Pleistocene–Holocene transition in Guanajuato, central Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 28(1), 81–91. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0685-8>
- Erdtman, O. S. (1952). *Pollen morphology and plant taxonomy. Angiosperms. (An introduction to Palynology)*, Stockholm, Sweden: Almqvist & Wiksell.
- Escarraga-Paredes, D. S., Torrescano-Valle, N., y Islebe, G. A. (2014). Análisis de la relación vegetación-lluvia de polen actual de las comunidades vegetales en el Noroeste de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica*, 38, 27–52.
- Flores Domínguez, A. D., Priego-Santander, A., y Ruiz-Careaga, J. (2014). Componentes del paisaje en el estado de Puebla, México. En J. Ruiz Careaga, R. Castelán Vega, V. Tamariz Flores y M. A. Hernández (Eds). *Ciencias Ambientales. Temáticas para el Desarrollo. Volumen VII* (pp. 65–72). México: Dirección de Fomento Editorial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Gallardo-Cruz, J. A., Meave, J. A., y Pérez-García, E. A. (2005). Estructura, composición y diversidad de la selva baja caducifolia del Cerro Verde, Nizanda (Oaxaca), México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 76, 19–35.
- Gaceur, E., Desprat, S., Rouis-Zargouni, I., Hanquiez, V., Lebreton, V., Combourieu Nebout, N., y Kallel, N. (2017). Pollen distribution in surface sediments of the northern Lower Medjerda valley (northeastern Tunisia). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 247, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.07.009>
- Grimm, E. C. (2011). Tilia (version 1.7.16) [software]. Springfield, USA: Illinois State Museum, Research and Collection Center.
- Hammer, Ø., Harper, D. A., y Ryan, P. D. (2001). PAST: paleontological statistical software for education and data analysis. *Paleontol Assoc* 4:1–9.

- Islebe, G. A., Villanueva-Gutiérrez, R., y Sánchez-Sánchez, O. (2001). Relación Lluvia de Polen-Vegetación en Selvas de Quintana Roo. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, (69), 31–38.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Fisher, C. T., Pollard, H. P., y Rodríguez-Pascua, M. A. (2005). Lake level change, climate, and the impact of natural events: the role of seismic and volcanic events in the formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacan, Mexico. *Quaternary International*, 135(1), 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.10.022>
- Israde-Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García, M. S., Bischoff, J., Domínguez Vázquez, G., y Garduño Monroy, V. H. (2010). Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 345–357.
- Jantz, N., Homeier, J., León-Yáñez, S., Moscoso, A., y Behling, H. (2013). Trapping pollen in the tropics-Comparing modern pollen rain spectra of different pollen traps and surface samples across Andean vegetation zones. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 193, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2013.01.011>
- Kruskal, J. B. (1964). Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method. *Psychometrika* 29, 115–129
- Li, D., Ma, Y., Meng, H., Guo, C., Hu, C., Liu, J., ... Wang, K. (2019). Pollen dispersal and representation of the “Forest Island” within the Chinese desert-loess transitional zone. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 263, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.02.001>
- Liu, H., Cui, H., Pott, R., y Speier, M. (1999). The surface pollen of the woodland-steppe ecotone in southeastern Inner Mongolia, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 105(3–4), 237–250. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(98\)00074-8](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(98)00074-8)
- Lozano-García, M. S. y Martínez-Hernández, E. (1990). Palinología de los Tuxtlas: especies arbóreas. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Publicaciones Especiales No. 3. México D. F. 61 p.

- Lozano-García, S., Correa-Metrio, A., & Luna, L. (2014). Análisis de la lluvia de polen moderna de la cuenca de México: una herramienta para la interpretación del registro fósil. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 1–10.
- López-Sáez, J. A., Glais, A., Tsiftsis, S., y Lezpez, L. (2018). Modern pollen–vegetation relationships along an altitudinal transect in the Lefka Ori massif (western Crete, Greece). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 259, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.10.006>
- Medina-García C. (2016). *Bases para el conocimiento de los pisos bioclimáticos, la vegetación y la flora del occidente de Michoacán (México)*. (Doctoral dissertation). Universidad de Santiago Compostela, Galicia, España.
- Moscol Olivera, M. M., Duivenvoorden, J. F., y Hooghiemstra, H. (2009). Pollen rain and pollen representation across a forest-páramo ecotone in northern Ecuador. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 157(3–4), 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.05.008>
- Molina-Paniagua M.E., y Zamudio-Ruíz, S. (2010). Fascículo complementario XXV. Estudio florístico del pedregal de Arócutin, en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo Complementario XXV*, 1–42.
- McCune, B., y Grace, J. B. (2002). *Analysis of Ecological Communities*. Gleneden Beach, Oregon, USA. MjM Software Design.
- McCune, B., y Mefford, M. J. (2006). PC-ORD. *Multivariate Analysis of Ecological Data*. Version 5.31. Oregon, USA: Gleneden Beach: MjM Software Design.
- Minchin, P. R. (1987). An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination. *Vegetatio* 69, 89–107.
- Ortega-Rosas, C. I., Peñalba, M. C., y Guiot, J. (2008). Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico, based on modern and fossil pollen data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 151, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2008.01.008>

- Palacios-Chávez, R., Ludlow-Wiechers, B., y Villanueva, R. (1991). *Flora Palinológica de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an. Quintana Roo, México*. Chetumal, Quintana Roo, México: CIQRO. 321
- Pérez-Calix, E. (1996). Flora y vegetación de la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. *Fascículo complementario XIII*, 1-73.
- Priego-Santander, A. G., Isunza-Vera, E., Luna-González, N., y Pérez-Damián, J. L. (2003). *Tipos morfométricos del relieve de México, a escala 1:250 000*. México: Dirección General de Investigaciones en Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología (INE), Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Retrieved from <http://www.emapas.inecc.gob.mx/>.
- Priego-Santander, A., Bocco, G., Mendoza, M., y Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones En Geografía Ambiental.
- Palacios-Chávez, R., Ludlow-Wiechers, B., y Villanueva-Gutiérrez, R. (1991). *Flora palinológica de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo, México*. Chetumal, México: Centro de Investigaciones de Quintana Roo.
- Raygadas-Torres, S. (2011). *Aplicación de técnicas para el reconocimiento de uso de hábitat en dos especies de aves acuáticas residentes del Lago de Cuitzeo* (Tesis de Maestría). Facultad de Biología, UMSNH, Morelia, México.
- Rangel-Churio, J. O. (2005b). Lluvia de polen a lo largo de los transectos del macizo de Tatamá. In T. Van der Hammen, J. O. Rangel-Churio, y A. Cleef, (Eds.), *Estudios de Ecosistemas Tropandinos: La Cordillera Occidental Colombiana–Transecto Tatamá* (Volumen 6, pp. 711-755). Berlín: Ecoandes. J. Cramer.
- Rzedowski, J., y Calderón de Rzedowski, G. (1987). El bosque tropical caducifolio de la región Mexicana del Bajío. *Trace*, 12, 12-21.

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* [pdf]. Retrieved from www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

Rzedowski, J., y Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botanica Mexicana*, 102, 1–23.

Zacarias-Eslava, A. E., Cornejo-tenorio, G., Cortés-flores, J., González-Castañeda, N., y Ibarra-Manríquez, G. (2011). Composición, estructura y diversidad del cerro El Águila, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 854–869.

Capítulo IV. Integration of landscape approaches for the spatial reconstruction of the vegetation

4.1 Abstract

Reconstruction of ancient environmental conditions based on traditional analyzes such as pollen and other proxies has provided understanding of climate variation and its influence on vegetation. These studies, however, are restricted to site-specific scales, and have overseen the spatial understanding of past vegetation patterns. Hence, reconstruction of spatial distribution patterns of vegetation is yet a pending issue in paleoecological studies. The objective of this chapter is to develop a methodological integration of landscape approaches (paleoecological, bioclimatic and geographical) to reconstruct spatial distribution patterns of vegetation in the Purepecha region in central Mexico. Correlation of climatic patterns, pollen rain, paleoecological data and physical landscape components were jointly analyzed with the aid of a Geographic Information System. Result from this integrated approach indicated that ca. 1,000 B.C. (Preclassic period) climatic conditions were relatively more humid than the current climatic. The dry climatic conditions were preferably dominant on valleys, plains and footslopes. On the contrary, humid conditions were preferably distributed in hills and mountain land forms. Our outcomes provide a reproducible integrated methodology for reconstructing spatial patterns of vegetation. We, further, document for the first time, the past spatial vegetation patterns in the core of the Purepecha culture.

4.2 Introduction

Vegetation is a key component and one of the most recognizable elements on the Earth surface (Zonneveld, 1989). Vegetation distribution and composition are determined by climatic, geomorphological, soil and ecological factors, which interact simultaneously in long periods of time (Velázquez, Medina-García, Durán-Medina, Amador & Gopar-Merino, 2016). While deep knowledge of the description and dynamics of local and regional vegetation is constantly rising (Rzedowski & Calderon, 2013), there are still limited methodological contributions to reconstruct vegetation patterns, especially during the last millennium.

There are several approaches focusing at explaining the dynamic nature of vegetation. The paleoecological approach is based on the interpretation of fossil pollen and other proxies (e.g. diatoms, ostracods, charcoal) an objective view of climatic variations (Israde-Alcántara et al., 2010). The approach also provides valuable information on the impact of ancient societies (Islebe et al. 2016). The bioclimatological approach focus on

studying climate-vegetation relationship (Rivas-Martínez, Rivas-Sáenz & Penas, 2011). This approach has been recently used as a tool for spatial reconstruction of the native vegetation (Castro-López and Velázquez, 2018). The geographical approach relies upon land forms and, soils and other physical attributes to delineate vegetation patterns. This approach uses Geographic Information Systems (GIS) as a main integrative tool (Mas et al., 2004; Velázquez et al., 2016) enabling mapping and monitoring of a group of individuals, populations and plant communities with different spatial resolution (Pedrotti, 2013). Although there are numerous investigations to quantitatively reconstruct spatial patterns of vegetation, outcomes are yet far from being completed. Attempts to formalize the approaches have resulted in a great deal of interrelated and practical terminology under multiple forms (Reed, Deakin & Sunderland, 2014). For this reason, the problem persists due to the lack of an integrative methodology that combines different approaches, namely: paleoecological, bioclimatic and geographical, for contributing to the historical mapping of the vegetation. Any attempt to build a holistic approach will lead to a thorough understanding of the spatial distribution of vegetation. Some integrative methods have been proposed to reconstruct past scenarios from different perspectives. Some take as basis models to estimate the source area of the pollen and their deposits (Sugita, Parshall, Calcote & Walker, 2010). Others come to integrate landscape elements examined from a GIS (Etter, McAlpine & Possingham, 2008; Brouwer, 2013). In the same way, Caseldine & Fyfe (2006) integrate specific pollen parameters, vegetation mosaic, and landscape elements to simulate the distribution of pollen in a specific position within the landscape. Carrillo-Bastos, Islebe & Torrescano-Valle (2012) used fossil pollen interpolation methods to reconstruct the vegetation cover and infer precipitation variations. More comprehensive studies are reported by Gopar & Velázquez (2016) under a Boolean prediction framework giving emphasis to bioclimatic zoning. While the results are encouraging, they still offer limited outcomes. Reed, Van Vianen, Deakin, Barlow & Sunderland et al. (2016) stated that the alternative of developing a holistic approach will tend towards providing detailed solutions to the problems of structure, composition and spatial distribution of the past, present and future vegetation. The integration is paramount to the relevance of contribution to understand the spatial-specific impacts of climate change. However, this integration is still, to our knowledge, absent in scientific literature. The objective of this chapter is to provide an integrative methodology of approaches (paleoecological, bioclimatic and geographical) to express the changes of spatial

distribution patterns of vegetation in different time periods. This chapter focuses on the Purepecha region between the boundaries from Michoacan and Guanajuato. The region was limited because it has high plant and climatic diversity (Rzedowski & Calderon, 2013).

4.3 Methods

4.3.1 Study Area

The area of study is located in the central part of the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field (MGVF) (Cano-Cruz & Carrasco-Núñez, 2008; Figure 4.1). The MGVF is controlled by the fault system with East-West direction (Garduño-Monroy et al., 2011). Volcanic activity has had significant impact on landscape formation from Oligocene to Holocene (Gómez-Vasconcelos, Garduño-Monroy, Macías, Layer & Benowitz, 2015). Rocks that emerge on the surface are: basalts, andesites, rhyolites, ignimbrites, granites (Cano-Cruz & Carrasco-Núñez, 2008; Gómez-Vasconcelos et al., 2015).

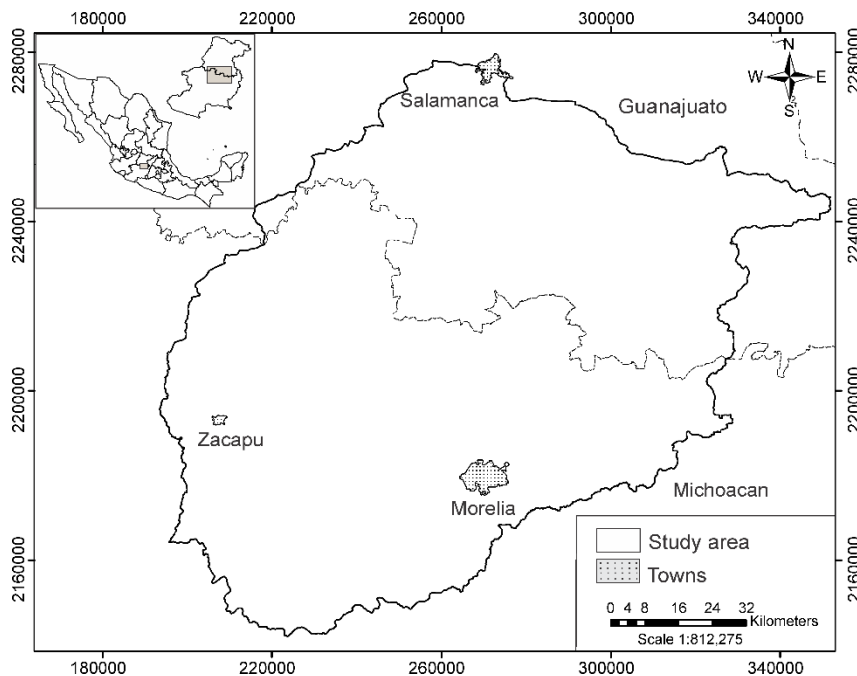


Figure 4. 1 Location of the study area. The figure shows the most important locations

The altitudinal gradient oscillates from 1,700 m.a.s.l. (meter above sea level) in the plains to 3,400 m.a.s.l. in the mountain area. Precipitation is controlled by the West winds

carrying high precipitation and is concentrated, mainly, in the mountain zone (Reyes, Douglas & Maddox, 1994). Precipitation varies from 1,200 to 600 mm with an average temperature of 20°C (INEGI, 2010). In elevations above 2,000 m is recurrent to find vegetation types such as: *Abies*, *Pinus*, *Quercus*, *Arbutus*, *Alnus*, *Buddleja*, *Crataegus*, *Clethra* (Pérez-Calix, 1996). In elevations less than 2,000 m, the predominant genera are *Acacia*, *Bursera*, *Cedrela*, *Condalia*, *Euphorbia*, *Erythrina*, *Eysenhardtia*, *Forestiera*, *Yucca* and in the proximity of the rivers *Salix*, *Taxodium*, *Alnus* and *Fraxinus* (Rzedowski & Calderon, 2013). Over the last few decades, the plant diversity has experienced high degree of disturbance, especially on foot slopes, valleys and plains (Villaseñor & Ortiz, 2012).

4.3.2 Bioclimatic Analysis

The bioclimatic analysis was carried out using the databases of the Digital Climatic Atlas of Mexico (version 2.0) (<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>). The layers are in raster format with pixel of 1km². The raster contains average temperature and precipitation information from 1902 to 2011. Raster layers were imported into the ArcGIS to calculate bioclimatic indexes. The indexes used were the annual ombrothermic index (**Io = (Pp/Tp) * 10**), ombrothermic index of the driest bimester of the driest quarter of the year (**Iod2 = (Ppd2/Tpd2) * 10**) and thermicity index (**It = (T + M + m) * 10**). The results of the indexes were compared with bioclimatic keys developed by Rivas-Martínez et al. (2011) to identifying bioclimates, thermotypes and ombrotypes. The generated information was transformed to vector format to facilitate the editing of the data and to improve its spatial expression. The minimum cartographic area was one km² to maintaining consistency in the reading of the map. Our study only presents the thermotypes and ombrotypes to scale 1: 250,000 with projection to NAD 1927 UTM 14 N Zone.

4.3.3 Pollen Rain Analysis

In total, 57 samples of moss and surface water were collected following a climatic gradient from dry tropical to wet temperate conditions. Samples were collected within different types of vegetation: temperate pine-oak forests and tropical dry forests. Pollen grains were extracted using the acetolysis technique of Erdtman (1952). Subsequently,

the samples were mounted with glycerin for identification. An optical microscope was used to identify pollen grains until reaching a minimum of 300 grains of arboreal taxa. Pollen taxa that presented more than 2% were used for Canonical Correspondence Analysis (CCA) to examine whether they were related to climatic patterns. The CCA is a statistical technique for exploring relationships between two multivariate sets of variables (Gauch, 1982). The analysis was done with the PC-ORD 5 Software (McCune & Mefford, 2006).

4.3.4 Radiocarbon Data and Pollen Diagrams

The paleoecological approach was used to have a chronological framework in the lake sediments (Israde-Alcántara et al., 2010). Research outcomes often lack calibrations, so that dating uncertainties remain (Giesecke et al., 2014). We conducted a review of the paleoecological studies conducted in the study area for C14 dating. The database was calibrated to calendar years using Calib 14 (version 7.1) (Stuiver, Reimer & Reimer, 2018). All the lakes located within the study area were evaluated in the present survey. A first approximation ca. 1,000 B.C. showed a greater relationship in the chronological dating. On the dating indicated, percentage data of pollen and the interpretations of the authors were collected for the model. In the same way, the minimum, average and maximum values of the taxa were collected throughout the diagram.

4.3.5 Bioclimatic approach

The isobioclimates were used to build a frame of reference in relation to the vegetation cover. The isobioclimates are the combination of bioclimates, thermotypes and ombrotypes. All correlations were estimated in GIS. Landscape components were overlapped to find correlation patterns (Figure 4.2). Subsequently, we placed the percentage values of pollen fossil in relation to the reference frame. In this test, CCA results were also used to validate the information. The isobioclimates that were empty, subsequently were re-labeled based on the climatic gradient expressed by Gopar-Merino, Velázquez & Giménez de Azcárate (2015).

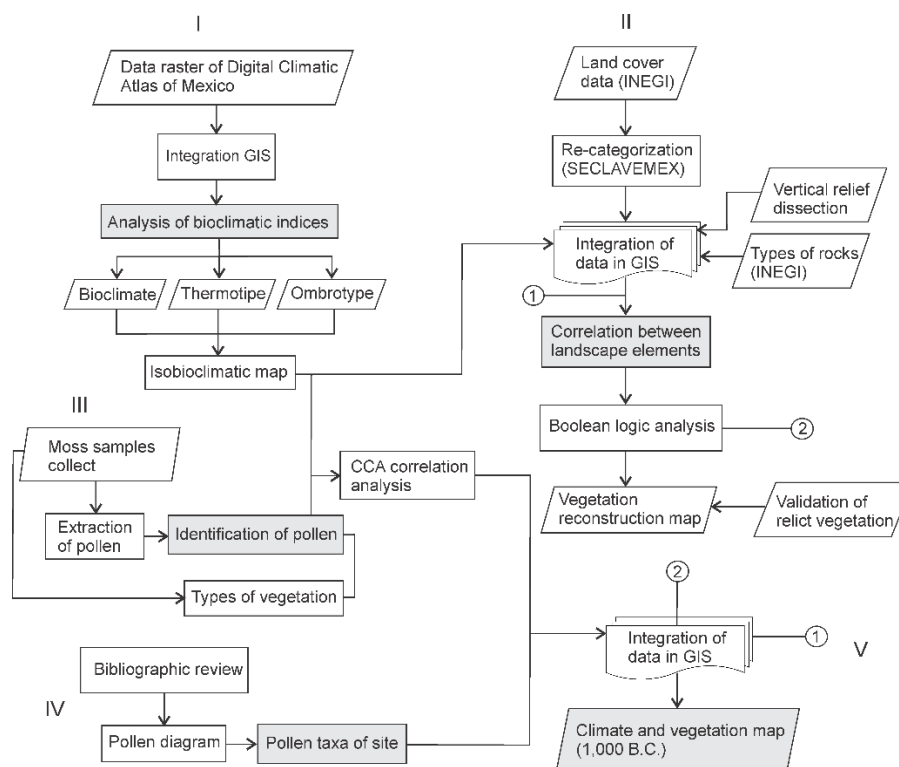


Figure 4. 2 Methodological processes for the reconstruction of the vegetal landscape. Each step must be done independently

4.3.6 Statistical Analysis

Data under study that come from different approaches were subjected to Canonical Correspondence Analysis to identify patterns of climatic, plant species assemblages and landscape components (Velázquez et al., 2016). Best ordinations axes with significant values to depict patterns were chosen and from there plant species assemblages and its distribution were defined.

4.4. Results

The integration of landscape approaches (paleoecological, bioclimatic and geographical) under a baseline allowed the methodological construction for the reconstruction of climatic patterns and vegetation cover. The current bioclimatic analysis was determined by three thermotypes (temperature gradient) and three ombrotypes (precipitation gradient). The mesotropical was the thermotypes that occupied the largest area, about 84%. Whereas the thermotropical about 14% and the supratropical about 2% (Figure 4.3).

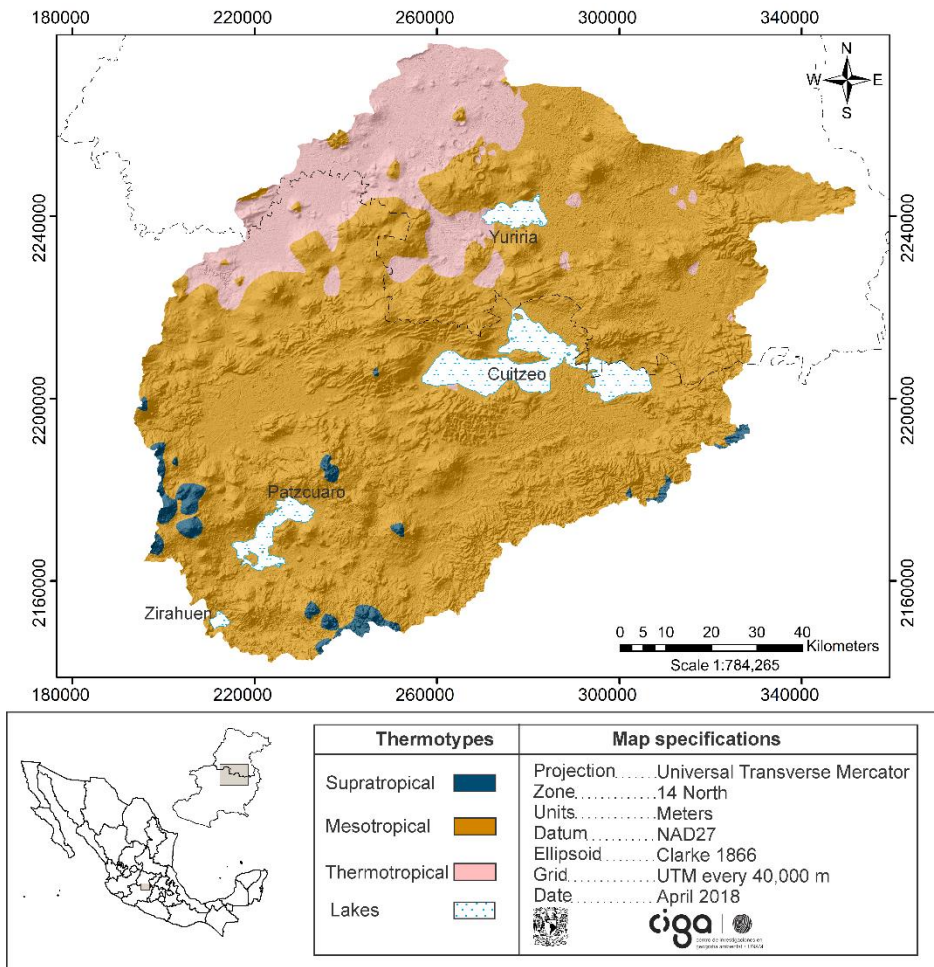


Figure 4. 3 Distribution of current thermotypes (temperature gradient)

The ombrotypes is composed by the dry ombrotype with 49% of the total surface, followed by the subhumid ombrotype with 40% and the humid ombrotype around 11% (Figure 4.4).

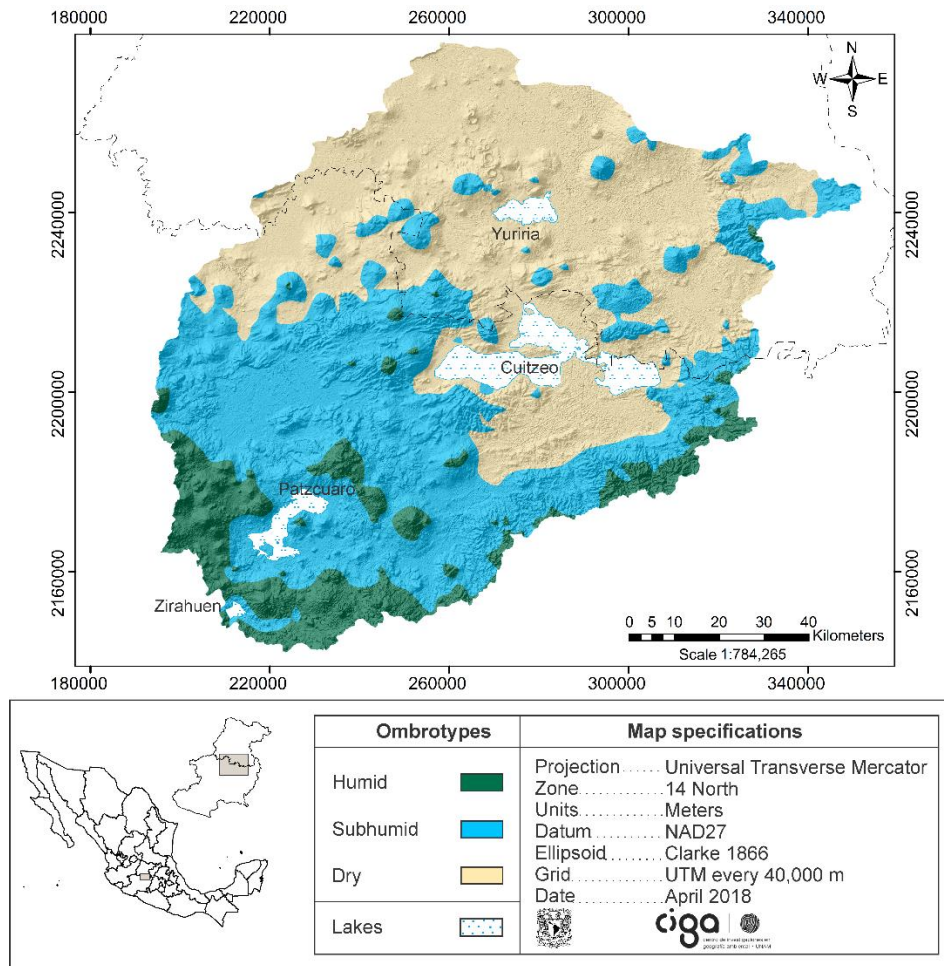


Figure 4. 4 Current distribution ranges of ombrotypes (precipitation gradient)

The CCA showed that the environmental variables showed a high relation with pollen (Figure 4.5). The first axis contributed 11.2% with positive regression coefficient between humid climates to subhumid and temperate pollen. While dry climates showed negative regression in relation to tropical pollen and grasslands. The third axis contributed 6.4% of the variance explained. In this axis the positive regression coefficient was associated with tropical and temperate taxa. On the other hand, pollen grasslands showed negative values. It should be also added that the Pearson Correlation for axis 1 and Axis 3 was 0.76 and 0.75 close to 1. Thus, our results indicate a good segregation of the data. In the tropical pluviseasonal mesotropical humid isobioclimate (TPMH) presented a greater relation to *Pinus*, *Quercus* and *Alnus*. The tropical pluviseasonal mesotropical subhumid (TPMSH) showed not relationship with any taxa specific.

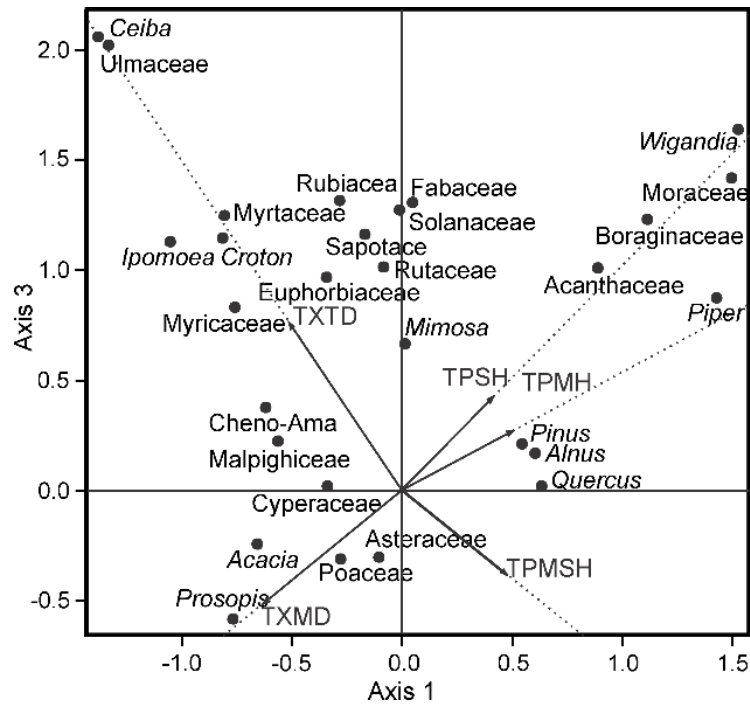


Figure 4. 5 Organizational chart of pollen taxa in relation to current isobioclimates. Environmental variables (isobioclimates) are displayed with arrows. TPSH; tropical pluviseasonal supratropical humid, TPMH; tropical pluviseasonal mesotropical humid, TPMSH; tropiical pluviseasonal mesotropical subhumid, TXMD; tropical xeric mesotropical dry and TXTD; tropical xeric thermotropical dry

The calibration of C14 dating revealed that six sites have corresponded to 1,000 B.C., with a variation of ± 200 years. Figure 4.6 compares the paleoecological records collected within the study area. Figure only show the quantitative data of the proxies. For this dating, the study area was represented by mesotropical thermotype and humid ombrotype in most of the surface. On the other hand, a dry isobioclimate was observed (Figure 4.7).

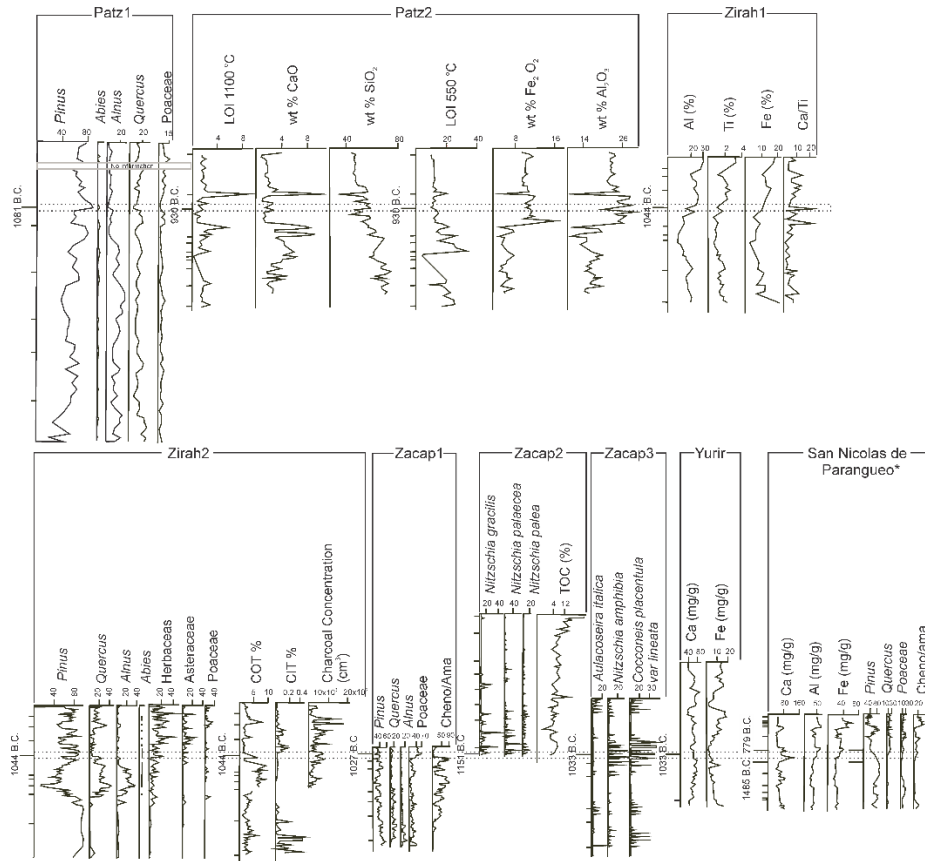


Figure 4. 6 Diagram of proxies located within the study area. The dotted horizontal line indicates the worked age. Patz1 (Watts & Bradbury, 1982), Patz2 (Metcalfé et al., 2007), Zirah1 (Ortega et al., 2010), Zirah2 (Torres-Rodríguez, Lozano-García, Figueroa-Rangel, Ortega-Guerrero & Vázquez-Castro, 2012), Zacap1 (Lozano-Garcia & Xelhuantzi-López, 1997), Zacap2 (Leng, Metcalfé & Davies, 2005), Zacap3 (Arnauld, Metcalfé & Petrquin, 1997), Yurir (Metcalfé et al., 1989) and San Nicolas de Parangueo (Brown, 1984) (*) interpolated data

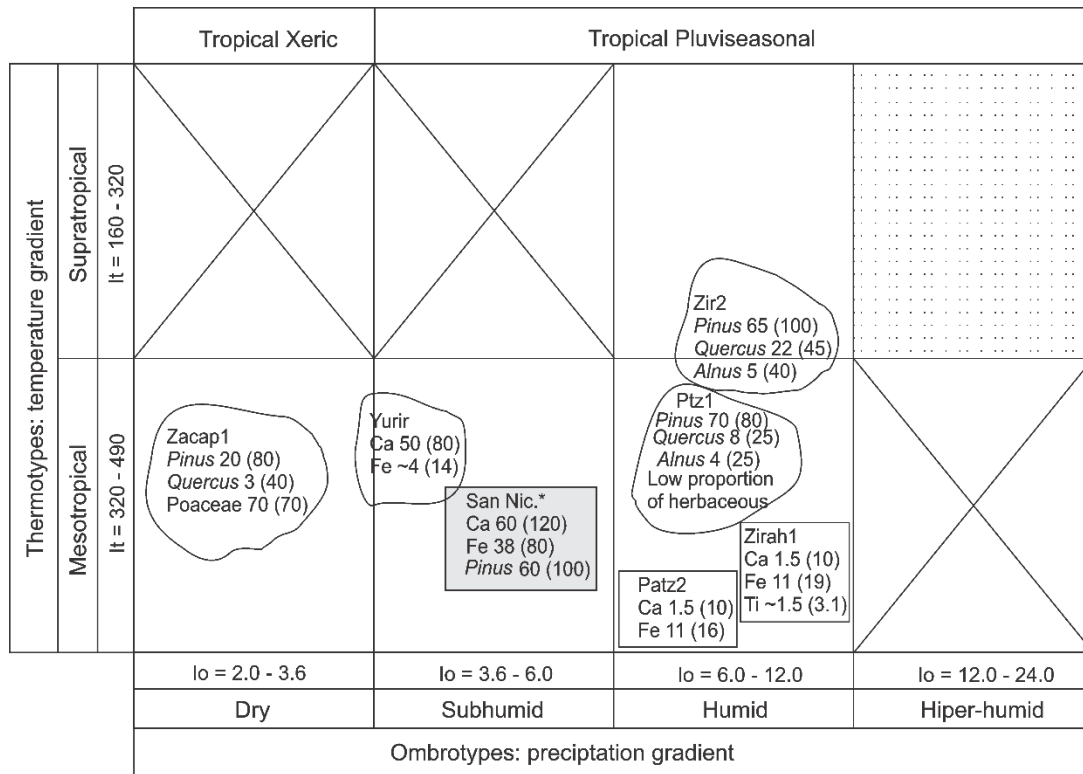


Figure 4. 7 Diversity climates in the area of study ca. 1,000 B.C. Climate in “X” are not available in the study area. Climate of the hatched area is located at latitudes above 3,100 m.a.s.l. * Data interpolated

4.7 Discussion

The integration of landscape approaches provides a simple and useful tool for reconstructing past scenarios. A first approximation ca. 1,000 B.C. indicates that the humid ombrotype were located in the areas of hills, foot of mounts and dry ombrotype in the valleys. Torres-Rodríguez et al. (2012) report at the lake Zirahuen humid conditions with elements of Mesophilic forest before this data, subsequent to this period a decrease in humidity persists. Rivas-Martínez et al. (2011) argues that climates are positively associated with the altitudinal gradient, thermal and pluviometrical, where its regional distribution follows clear and uniform altitudinal gradients in systematic order. This would reinforce the argument that climatic strips showed a displacement following this climatic gradient.

The methodological integration of landscape approaches (paleoecological, bioclimatic and geographical) enabled the recognition of the distribution of climatic patterns. This type of research is widely documented by paleoecological studies on a punctual scale.

However, their understanding and spatial expression have been limited due to the scarcity of suitable sites. Therefore, they contribute to understanding part of the process and not the regional complexity. The integration of approaches gives a clear and concise view of the chorological changes in climatic patterns and plant communities in different temporal scales.

GIS is a powerful tool for integrating, analyzing, managing input data and output data from the implemented models (Devereux, Devereux & Lindsay, 2004). Leverington, Teller & Mann (2002) argue that the use of GIS lies in the rapidity to generate quantitative and geo-referenced databases. It is used such as an efficient tool to integrate local and spatial database and to express the scenarios of the historical landscape (Gaudin, Dominique & Lanos, 2008; Carrillo-Bastos et al., 2012; Brouwer, 2013). It must be also added that an adequate integration of landscape components, hierarchically analyzed, will allow recognizing the different patterns that give subsistence to the vegetation types (Gopar & Velázquez, 2016), their different degrees of transformation (Etter et al., 2008) and provide sustainable natural resource solutions on multiple timescales (Reed et al., 2016). The results can be even more promising if more emphasis is given to bioclimatic zones. Gopar & Velázquez (2016) report that bioclimatic analysis is an excellent tool to identify the climate-vegetation relationship, especially in regions with high geological, ecological and human complexity. Currently, there is a rise in spatializing the historical landscape. However, the validation and calibration of historical maps has been hampered by the lack of more precise spatial data (Etter et al., 2008). By virtue of this, biophysical characteristics provide an alternative on the conditions of habitat, their projection with the same physical characteristics reflected the complement of species associated to them (Simonson, Allen, Parham, Basto-Santos & Hotham, 2018).

Overall, the analyses here used have proven to be an effective tool to help reconstructing vegetation distribution patterns. Nonetheless, pending uses remain such as: the association of the pollen spectrum with the climate and their relationship with vegetation patterns was not fully completed. It is necessary to recalibrate dates to have a complete chronological framework of the lake sediments. Furthermore, limitations of the study should be considered for future research; in particular, it can be used if topography has not changed significantly. García-Quintana et al. (2016) report that during the last 3,000 years B.P. no major changes have occurred compared to what happen during the Pleistocene and the beginning of the Holocene. It should be also mentioned that the

difference between lake sedimentation rates makes difficult having a linear chronological framework (Israde-Alcántara et al., 2010). In the same way, it is also necessary to incorporate the orientation of slopes to have a regional overview, since types of vegetation are some confined to certain slope orientations favoring their establishment and development (Rzedowski, 2006).

To conclude, the integration of paleoecological, bioclimatic and geographical approaches showed promising results for understanding past vegetation distribution patterns. This information may be key to quantitatively assessing in a region with a great cultural value.

4.8 References

- Arnauld, C., Metcalfe, S.E., & Petruquin, P. (1997). Holocene climatic change in the Zacapu lake basin, Michoacan: synthesis of results. *Quaternary International*, 43(97), 173–179.
- Brouwer, M. (2013). Reconstructing total paleo-landscapes for archaeological investigation: an example from the central Netherlands. *Journal of Archaeological Science*, 40(5):2308-2320 doi:10.1016/j.jas.2013.01.008
- Brown, R. B. (1984). *The paleoecology of the northern frontier of mesoamerica (pollen, mexico, archaeology)* (Doctoral dissertation), University of Arizona, USA.
- Caseldine, C., & Ryfe, R. (2006). A modelling approach to locating and characterising elm decline/landnam landscapes. *Quaternary Science Reviews*, 25, 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.015>
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G. A., & Torrescano-Valle, N. (2012). Geospatial analysis of pollen records from the Yucatán Peninsula, Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(6):429–437. <https://doi:10.1007/s00334-270 012-0355-1>
- Cano-Cruz, M., & Carrasco-Núñez, G. (2008). Evolución de un cráter de explosión (maar) riolítico: Hoya de Estrada, Campo Volcánico Valle de Santiago, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3):549–564

- Castro-López, V., & Velázquez, A. (2019). Reconstruction of native vegetation based upon integrated landscape approaches. *Biodiversity and Conservation*, 28(2), 315–327. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1655-2>
- Devereux, B. J., Devereux, L. S., & Lindsay, C. (2004). Modelling the impact of traffic emissions on the urban environment: a new approach using remotely sensed data. In R. E. J. Kelly, N. A. Drake & S. L. Barr (Eds.), *Spatial modelling of the terrestrial environment* (pp. 227-242). Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Etter, A., McAlpine, C., & Possingham, H. (2008). Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: A regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), 2–23. <https://doi.org/10.1080/00045600701733911>
- Erdtman, O. S. (1952). *Pollen morphology and plant taxonomy, Angiosperms, (An introduction to Palynology)*. Stockholm, Sweden: Almqvist and Wiksell,
- Garduño-Monroy, V. H., Soria-Caballero, D. C., Israde-Alcántara, I., Madrigal, V. M. H., Rodríguez-Ramírez, A., Ostroumov, M., ... Mora-Chaparro, J. C. (2011). Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of Lake Pátzcuaro, Michoacán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 50(2), 147–161.
- Gauch, H. G. (1982). *Multivariate analysis in community ecology*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Gaudin, L., Dominique, M., & Lanos, P. (2008). Correlation between spatial distributions of pollen data, archaeological records and physical parameters from north-western France: a GIS and numerical analysis approach. *Vegetation History and Archaeobotany*, 17, 585–595. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0172-8>
- García-Quintana, A., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Cervantes-Solano, M., Osorio-Ocampo S., Macías, J. L., & Urrutia-Fucugauchi, J. (2016). Datación magnética de rocas volcánicas formadas durante el Holoceno: caso de flujos de lava alrededor del Lago de Pátzcuaro (campo volcánico Michoacán-Guanajuato). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 33(2): 209-220.

- Giesecke, T., Davis, B., Brewer, S., Finsinger, W., Wolters, S., Blaauw, M., ... Bradshaw, R. H. W. (2014). Towards mapping the late Quaternary vegetation change of Europe. *Vegetation History and Archaeobotany*, 23(1), 75–86. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0390-y>
- Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A., & Giménez A, J. (2015). Bioclimatic mapping as a new method to assess effects of climatic change. *Ecosphere*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1890/ES14-00138.1>
- Gopar-Merino, L. F., & Velázquez, A. (2015). Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM.*, (1–14). <https://doi.org/10.14350/rig.46688>
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monrroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., & Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301:128–147. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.005>
- Israde-Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García, M. S., Bischoff, J., Domínguez-Vázquez, G., & Garduño Monroy, V. H. (2010). Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 345–357.
- Ilebe, G. A., Domínguez-Vázquez, G., Espadas-Manrique, C., Figueroa-Rangel, B., González-Yajimovich, O., Hernández-Arana, H., ... Torrescano-Valle, N. (2016). Cambio climático: con- texto histórico, paleoecológico y paleoclimático. Tendencias actuales y perspectivas. In P. Balvanera, J. E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero & J. J. Schmitter-Soto (Eds.), *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* (pp. 25-56). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal, México*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>.

- Leng, M. J., Metcalfe, S. E., & Davies, S. J. (2005). Investigating Late Holocene climate variability in central Mexico using carbon isotope ratios in organic materials and oxygen isotope ratios from diatom silica within lacustrine sediments. *Journal of Paleolimnology*, 34(4), 413–431. <https://doi.org/10.1007/s10933-005-6748-8>
- Leverington, D. W., Teller, J. T., & Mann, J. D. (2002). A GIS method for reconstruction of late Quaternary landscapes from isobase data and modern topography. *Computers and Geosciences*, 28(5), 631–639. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00097-8)
- Lozano-García, M.S., & Xelhuantzi-López, M. S. (1997). Some problems in the late Quaternary pollen records of Central Mexico: Basins of Mexico and Zacapu. *Quaternary International*, 43–44(97), 117–123. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(97\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(97)00027-X)
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: A nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>
- McCune, B. & Mefford, M. J. (2006). *PC-ORD, multivariate analysis of ecological data*, (version 1.7.16) [MJM software]. Oregon, USA: Gleneden Beach.
- Metcalfe, S. E., Street-Perrott, F. A., Brown, R. B., Hales, P. E., Perrott, R. A., & Steininger, F. M. (1989). Late Holocene human impact on Lake basins in Central Mexico. *Geoarchaeology: An International Journal*, 4(2):119–141
- Metcalfe, S. E., Davies, S. J., Braisby, J. D., Leng, M. J., Newton, A. J., Terrett, N. L., & O'Hara, S. L. (2007). Long and short-term change in the Pátzcuaro Basin, central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(3–4), 272–295. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.018>
- Ortega, B., Vázquez, G., Caballero, M., Israde, I., Lozano-García, S., Schaaf, P., & Torres, E. (2010). Late Pleistocene: Holocene record of environmental changes in Lake Zirahuen, Central Mexico. *Journal of Paleolimnology*, 44(3), 745–760. <https://doi.org/10.1007/s10933-010-9449-x>

- Pedrotti, F. (2013). *Plant and vegetation mapping*. Berlin and Heridelberg, Germany: Springer.
- Pérez-Calix, E. (1996). Flora y vegetación de la cuenca del lago de Zirahuén Michoacán, México. *Flora del Bajío y de regiones adyacentes, fascículo complementario XIII*, 1-73.
- Reyes, S., Douglas, M. W., & Maddox, R. A. (1994). El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP). *Atmósfera*, 7, 117–137
- Reed, J., Deakin, L., & Sunderland, T. (2014). What are integrated landscape approaches and how effectively have they been implemented in the tropics: a systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 4(2), 1–7. <https://doi:10.1186/2047-2382-4-2>
- Reed, J., Van Vianen, J., Deakin, E. L., Barlow, J., & Sunderland, T. (2016). Integrated landscape approaches to managing social and environmental issues in the tropics: learning from the past to guide the future. *Global Change Biology*, 22(7), 2540–2554. <https://doi.org/10.1111/gcb.13284>
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany 1*:1–634. <https://doi:10.5616/gg110001>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* [pdf]. Retrieved from www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Rzedowski, J., & Calderon de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botanica Mexicana*, 102, 1–23.
- Simonson, W. D., Allen, H. D., Parham, E., Basto-Santos, E., & Hotham, P. (2018). Modelling biodiversity trends in the montado (wood pasture) landscapes of the Alentejo, Portugal. *Landscape Ecology*, 33(5), 811–827. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0627-y>
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Reimer, R. W. (2018). CALIB 7.1 [WWW program]. Retrieved from <http://calib.org>.

- Sugita, S., Parshall, T., Calcote, R., & Walker, K. (2010). Testing the Landscape Reconstruction Algorithm for spatially explicit reconstruction of vegetation in northern Michigan and Wisconsin. *Quaternary Research*, 74(2), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.07.008>
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Figueroa-Rangel, B. L., Ortega-Guerrero, B., & Vázquez-Castro, G. (2012). Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(3), 764–778.
- Velázquez, A., García-Medina, C., Durán-Medina, E., Amador, A., & Gopar-Merino, L. F. (2016). *Standardized Hierarchical Vegetation Classification. Mexican and Global Patterns*. Switzerland: Springer.
- Villaseñor, J. L., & Ortiz, E. (2012). La familia Asteraceae en la flora del Bajío y de regiones adyacentes. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 259–291
- Watts, W. A., & Bradbury, J. P. (1982). Paleoecological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Research*, 17(1), 56–70. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(82\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(82)90045-X)
- Zonneveld, I. S. (1989). The Land Unit a fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology* 3(2):67–86.

Capítulo V

5.1 Discusión

La integración de enfoques paisajísticos (paleoecológico, geográfico y bioclimático) aportó información relevante sobre el conocimiento de la relación vegetación-clima y permitió generar un primer escenario histórico de los tipos de vegetación. No obstante, estas investigaciones integrativas han sido limitadas para el Centro de México, dado a que la mayoría se basan en estudios paleoecológicos procedentes de núcleos de sedimentos y de trincheras que son extraídos de los cuerpos lacustres (Israde-Alcántara et al., 2010; Correa-Metrio, Lozano-García, Xelhuantzi-López, Sosa-Nájera y Metcalfe, 2012; Lozano, Torres-Rodríguez, Ortega, Vázquez y Caballero, 2013). Los estudios mencionados anteriormente indican que las fluctuaciones climáticas, durante la época del Holoceno, han actuado como un factor importante en la expansión y en la contracción de los tipos de vegetación (Carrillo-Bastos, Islebe y Torrescano-Valle, 2012; Lozano-García, Torres-Rodríguez, Ortega, Vázquez y Caballero, 2013; Domínguez-Vázquez, Osuna-Vallejo, Castro-López, Israde-Alcántara y Bischoff, 2019). No obstante, las investigaciones paleoecológicas se concentran en áreas donde las condiciones ambientales son óptimas para conservar los microfósiles. Por ello, en áreas que no presentan las características ambientales favorables para la conservación es difícil realizar reconstrucciones. Por tanto, en las áreas mencionadas se necesitan realizar un mayor esfuerzo para conocer su historia ambiental y realizar una mejor reconstrucción espacial (Carrillo-Bastos, Islebe y Torrescano-Valle, 2012).

La bondad de integrar los enfoques es porque permite contar con una perspectiva analítica de las variaciones de la cubierta de vegetación a través de diferentes escalas temporales. La construcción de la integración fue posible a partir de la conjunción de cinco pasos metodológicos que fueron integrados en un SIG. En primer lugar, fue contar con una clasificación climática cuantificada que demostrara la relación existente entre la distribución de los patrones de vegetación y el clima (Rivas-Martínez, Rivas-Sáenz y Penas-Merino, 2011). El empleo del enfoque bioclimático es porque ha demostrado ser eficiente para explicar la distribución de la vegetación con sólo tomar los isobioclimas (Peinado, Monje-Arenas y Martínez-Parras, 2008). En segundo lugar, la correlación entre los componentes del paisaje como son; la cubierta de vegetación, los isobioclimas, la disección vertical, los tipos de rocas, los relictos de elementos arbóreos y el SIG, permitió reconstruir con mayor detalle la distribución de la cubierta de vegetación oriunda, especialmente en aquellas regiones que se han transformado por las fuertes presiones

antrópicas (Butzer y Butzer, 1997). Gopar-Merino y Velázquez (2016) reportan que la integración de enfoques (bioclimático y geográfico), permite predecir con claridad la cubierta de vegetación nativa e identificar nichos geo-ecológicos en regiones que presentan alta complejidad geológica. La integración de estos dos enfoques ha auxiliado a comprender e identificar cuál es el principal componente físico que mejor delimita la distribución de la vegetación a escala regional. En tercer lugar, el análisis de la lluvia de polen permitió identificar su relación con la vegetación en diferentes relieves. La utilidad de este análisis es porque se ha demostrado que puede identificar los cambios en la distribución de las especies y la estructura de las comunidades vegetales, determinadas por el gradiente hídrico, el sustrato y la topografía (Escarraga-Paredes, Torres-Valle e Islebe, 2014). Por ello, el análisis de polen constituye una herramienta fundamental para obtener información sobre la dinámica ecológica actual e integrar una fuente de información para los estudios paleoecológicos (Islebe, Villanueva-Gutiérrez y Sánchez-Sánchez, 2001; Domínguez-Vázquez, Islebe y Villanueva-Gutiérrez, 2004; Escarraga-Paredes, Torrescano-Valle y Islebe, 2014). En cuarto lugar, la recopilación de las investigaciones paleoecológicas dentro del área de estudio fue imprescindible para comparar su relación entre ellos. Por esta razón, algunas investigaciones han realizado recopilación de información y han comparado sus resultados con otros lagos del Centro de México, dando información relevante sobre el efecto del cambio climático hacia las comunidades vegetales (Ortega, Caballero, Lozano, Israde y Vilaclara, 2002; Caballero, Lozano-García, Vázquez-Selem y Ortega, 2010; Israde et al., 2010). Sin embargo, en el Centro de México las investigaciones paleoecológicas no han podido especializar los datos a causa del limitado número de sitios evaluados y al desconocimiento de las nuevas herramientas computacionales. La ventaja de integrar este enfoque es porque cuenta con análisis detallados de microfósiles y de análisis geoquímicos, los cuales pueden validar los modelos generados. Por ello, la integración del enfoque paleoecológico y el enfoque geográfico se ha venido empleando para explicar las variaciones de la vegetación y los cambios en el clima con resultados muy prometedores (Carrillo-Bastos et al 2012; Gaudin, Dominique y Lanos, 2008; Giesecke et al., 2014). Otras investigaciones han comparado los porcentajes de polen con modelos para cuantificar los cambios de la cubierta de vegetación del pasado (Sugita, Parshall, Calcote y Walker, 2010; Chaput y Gajewski, 2018). Sin embargo, las investigaciones mencionadas anteriormente usan las relaciones entre parámetros climáticos y los taxa de polen para reconstruir los climas en el pasado. Por ello, no han tomado como base una clasificación climática cuantificada, la

cual facilite identificar la relación entre el clima-vegetación y, por ende, ayude a reconstruir los tipos de vegetación. En la presente disertación se integró el enfoque bioclimático, el cual proporcionó información relevante sobre el clima y su relación con los tipos de vegetación a nivel regional. Por lo tanto, esta información permitió generar una primera aproximación sobre la distribución de los climas aproximadamente a los 1,000 a.C. (antes del presente). Para esta fecha las fronteras climáticas húmedas estaban distribuidas en montañas, en colinas y en algunas partes de las planicies. Las condiciones húmedas coinciden con lo reportado en otros estudios previos, en donde la vegetación arbórea pudo llegar a ser más densa y más productiva que en la actualidad (Watts y Bradbury, 1982; Torres-Rodríguez, Lozano-García, Figueroa-Rangel, Ortega-Guerrero y Vázquez-Castro, 2012; Park, Byrne, Böhnelt, Garza-Molina, y Conserva, 2010).

La limitación de la presente disertación es porque no se logró realizar un mapa de los tipos de vegetación, sólo se realizó una estimación de los climas a los 1,000 a.C. y con base en los climas se infirieron los tipos de vegetación. Por tanto, éste sería un primer escenario espacial antes del establecimiento de la cultura Purépecha. Otras limitantes son porque los estudios paleoecológicos presentan pérdidas y diferencias en la tasa de acumulación de los sedimentos a causa de los factores climáticos y antrópicos, por ello, no presentan un registro continuo y pocas veces son comparables debido a estas discrepancias (Israde et al., 2010). Además, hay que agregar también que diversas áreas son difíciles de realizar estudios paleoecológicos, debido a que no presentan condiciones favorables para la conservación de los microfósiles. A pesar de ello, la integración de los enfoques permitió tener un primer acercamiento sobre la distribución de los climas y reconocer los tipos de climas en los sitios que no cuentan con registros paleoecológicos. Sin embargo, el análisis espacial de los climas del pasado es algo que se ha limitado en otras reconstrucciones espaciales (Carillo-Bastos et al., 2012; Chaput y Gajewski, 2018).

El establecimiento de la agricultura, desde el siglo XVI, ha provocado la deforestación de los bosques de encinos y los bosques de pino en los límites inferiores del Bajío mexicano. Esta deforestación se intensifica durante el siglo XVIII (Butzer y Butzer, 1997). En la actualidad, la mayor parte de las áreas no tienen registros detallados de la vegetación nativa, la cual permita evaluar su nivel de diversidad. Por ello, el desconocimiento de la distribución de la vegetación nativa complica la implementación de acciones para el manejo sustentable de los recursos naturales, así como la protección de los ecosistemas y su biodiversidad (González-Solís et al., 2016). La inserción de los estudios geográficos

en la reconstrucción de la vegetación ha dado un aporte importante para reconstruir espacialmente las comunidades vegetales y reconocer cuantitativamente los cambios de la cubierta de vegetación. La ventaja es que cuenta con numerosas herramientas computacionales y geoestadísticas que posibilitan evaluar con detalle y con mayor rapidez la dinámica de la cubierta de vegetación y los usos del suelo (Leverington, Teller y Mann, 2002; Mendoza, Granados, Geneletti, Pérez-Salicrup y Salinas, 2011).

5.2 Conclusiones

La integración de enfoques (paleoecológico, geográfico y bioclimático) permitió tener un primer acercamiento sobre la dinámica de la vegetación, principalmente en regiones que manifiestan altas transformaciones vegetales debido a las fuertes actividades antrópicas. Los resultados muestran que la integración de enfoques es de gran utilidad para comprender la dinámica de la vegetación y su relación con los patrones climáticos. Es por ello, que la presente investigación proporcionó una línea base para la reconstrucción espacial de la vegetación nativa.

El primer objetivo de la disertación doctoral desarrollamos un método integrador (geográfico y bioclimático) para la reconstrucción de la vegetación nativa. La integración ayudó a demostrar que los insumos analizados jerárquicamente pueden definir con claridad la distribución de la vegetación a escala regional. Se distinguieron seis tipos de vegetación siendo el bosque tropical seco sub-caduco latifoliado de *Albizia-Senna-Bursera* el dominante en el área de estudio con un 51%.

El segundo objetivo de la disertación permitió tener una mejor comprensión sobre la correlación entre el espectro polínico y la vegetación en diferentes relieves. La integración del análisis multivariado e índices ecológicos mostró bondades para entender el comportamiento del espectro polínico. Por esta razón, los valores porcentuales del espectro polínico difieren en: montañas, colinas y llanuras. Los taxa templados como: *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* se encontraron mejor representados en las montañas y en las colinas. En llanuras estuvo caracterizada por taxa tropicales secos como: Euphorbiaceae, *Acacia*, *Celtis*, *Prosopis*, Fabaceae, *Ceiba*, entre otros.

El tercer objetivo de la disertación se logró desarrollar un método integrador de enfoques (paleoecológico, geográfico y bioclimático) para expresar cambios en los patrones de distribución espacial de la vegetación. La integración de enfoques mostró virtudes para

explicar la distribución de los patrones climáticos y, por ende, inferir los patrones de la vegetación. Por esta razón, las superficies climáticas húmedas cubrieron una mayor superficie a los 1,000 a. P. con una vegetación arbórea dominante.

Los resultados de la presente disertación pueden ser de gran utilidad para el entendimiento de los procesos ecológicos que acontecen en la vegetación, para completar los programas de monitoreo de la vegetación y los aprovechamientos de los recursos naturales. Además, los resultados pueden emplearse como insumo para evaluar cuantitativamente los cambios de la vegetación en diferentes periodos temporales. Lo que permitirá hacer mejores estimaciones sobre la dinámica de la vegetación y realizar mejores modelos a futuro para establecer planes de manejos y estrategias de conservación biológica.

5.3 Retos a futuro

La presente disertación se intentó explicar los procesos, las interacciones que preexistieron en el pasado y proporcionar un nuevo enfoque para tener una mejor comprensión sobre la dinámica de la vegetación. Sin embargo, conforme se fue desarrollando la disertación nuevas dudas surgieron sobre los procesos que ocurren en la actualidad. Por este motivo, es necesario continuar con los retos a futuro para mejorar las reconstrucciones de la vegetación y discernir el rol de las actividades antrópicas hacia los ecosistemas naturales.

En primer lugar, es necesario contar con más números muestras de musgos que abarquen la totalidad del territorio, especialmente en los sitios que no fueron muestreados. Para las áreas que no cuentan con vegetación natural es importantes colocar trampas de lluvia de polen. La información generada fortalecerá el modelo y tendrá una mejor comprensión sobre la dinámica de la vegetación. Por ello, algunos autores afirman que mientras más números de muestreos se realicen, en diferentes tipos de vegetación, ayudarán a comprender mejor el comportamiento del espectro polínico (Islebe et al., 2001; Domínguez-Vázquez et al., 2004; Escarraga-Paredes et al., 2014; Chang-Martínez-Domínguez-Vázquez, 2014).

En segundo lugar, para reforzar el conocimiento de la distribución espacial del espectro polínico y su relación con la cubierta de vegetación es necesario analizarlo con las herramientas geoestadísticas del SIG. El SIG han demostrado ser una herramienta

eficiente para espacializar los datos de la lluvia de polen, pero es poco utilizado en México (Flantua, Boxel, Hooghiemstra y Smaalen, 2007).

En tercer lugar, es necesario incorporar el enfoque arqueológico, el cual auxiliaría a reconocer con detalle el rol de las actividades antrópicas en la región. La incorporación de este enfoque, en los estudios históricos, ha permitido representar el impacto de la actividad antrópica hacia los recursos naturales (Etter, McAlpine y Possingham, 2008; Correa-Ayram et al., 2016). Por ello, algunas investigaciones han descrito el impacto antrópico y el grado de magnitud hacia los bosques nativos durante los últimos 1,500 años (Correa-Ayram et al., 2016). Aunque los esfuerzos son muy prometedores para el norte de Michoacán, aún carecen de estudios de la huella de intervención antrópica para el sur de Guanajuato. En esta última región se ha investigado las diferentes toponimias, sus ubicaciones de las diferentes culturas, sus tipos de arquitectura, sus relaciones sociales en algunos espacios específicos y han medido la influencia de los grupos sociales en los asentamientos (Fillini y Cárdenas-García, 2010; Gallardo-Ruíz, 2017; Lefebvre, 2017). Sin embargo, los datos de estas investigaciones aún no pasan de datos puntuales y, por ende, no han expresado el grado de perturbación de la vegetación. Por ello, se necesita realizar un mayor esfuerzo para ésta región dado a que no se comprende con plenitud qué componente, natural o antrópico, provocó la degradación de la vegetación nativa.

Por último, si se requiere realizar una reconstrucción hacia la época del Holoceno temprano o Pleistoceno es importante recopilar todos los fechamientos de los conos volcánicos, las oleadas piroclásticas, los volcanes monogenéticos, los montículos volcánicos, entre otros. La información permitirá reconocer que estructura geológica son más recientes que otras, la cual auxiliaría a diferenciar que estructuras geológicas podrían excluirse para mejorar las reconstrucciones espaciales.

5.4 Bibliografías

Butzer, K. W., y Butzer, E. K. (1997). The “natural” vegetation of the Mexican Bajío: Archival documentation of a 16th-century Savanna environment. *Quaternary International*, 43–44(97), 161–172. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(97\)00032-](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(97)00032-3)

- Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Xelhuantzi-López, S., Sosa-Nájera, S., y Metcalfe, S. E. (2012). Vegetation in western Central Mexico during the last 50 000 years: modern analogs and climate in the Zacapu Basin. *Journal of Quaternary Science*, 27(5), 509–518. <https://doi.org/10.1002/jqs.2540>
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M., Etter, A., Pérez Salicrup, D. (2016). Modelación espacial del tiempo de intervención antrópica sobre el paisaje: un caso de estudio en el sistema volcánico transversal de Michoacán, México. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 8, 183–205.
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G. A., y Torrescano-Valle, N. (2012). Geospatial analysis of pollen records from the Yucatán peninsula, Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0355-1>
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., y Ortega, B. (2010). Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 359–377
- Chaput, M. A., y Gajewski, K. (2018). Relative pollen productivity estimates and changes in Holocene vegetation cover in the deciduous forest of southeastern Quebec, Canada. *Botany*, 317, 299–317. <https://doi.org/10.1139/cjb-2017-0193>
- Domínguez-Vázquez, G., Islebe, G. A., y Villanueva-Gutiérrez, R. (2004). Modern pollen deposition in Lacandon forest, Chiapas, Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 131(1–2), 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.03.004>
- Domínguez-Vázquez, G., Osuna-Vallejo, V., Castro-López, V., Israde-Alcántara, I., y Bischoff, J. A. (2019). Changes in vegetation structure during the Pleistocene–Holocene transition in Guanajuato, central Mexico. *Vegetation History and Archaeobotany*, 28(1), 81–91. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0685-8>
- Escarraga-Paredes, D. S., Torrescano-Valle, N., y Islebe, G. A. (2014). Análisis de la relación vegetación-lluvia de polen actual de las comunidades vegetales en el Noroeste de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica*, 38, 27–52.

- Etter, A., McAlpine, C., y Possingham, H. (2008). Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: A regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), 2–23. <https://doi.org/10.1080/00045600701733911>
- Fillini, A., y Cárdenas-García, E. (2010). El Bajío, la cuenca de Cuitzeo y el estado teotihuacano: un estudio de relaciones y antagonismos. In B. Faugère-Kalfon (Ed), *Dinámicas culturales entre el Occidente, el Centro-Norte y la Cuenca de México, del preclásico al Epiclásico* (pp. 137-156). México: Centro de estudios mexicanos y centroamericanos, El Colegio de Michoacán.
- Gallardo-Ruíz, J. (2017). Nombrar y definir el territorio en situaciones de expropiación: El reconocimiento y reapropiación del territorio p'urhépecha a través de la toponimia y de la tradición oral. In K. Lefebvre & C. Paredes-Martínez (Eds), *Memoria de los nombres: La toponimia en la conformación histórica del Territorio. De mesoamérica a México* (pp. 65-83). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gutiérrez-Ayala, L. V., Torrescano-Valle, N., y Islebe, G. A. (2012). Reconstrucción paleoambiental del holoceno tardío de la reserva los petenes, Península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(3), 749–763.
- Gaudin, L., Marguerie, D., y Lanos, P. (2008). Correlation between spatial distributions of pollen data, archaeological records and physical parameters from north-western France: a GIS and numerical analysis approach. *Vegetation History and Archaeobotany*, 17, 585–595. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0172-8>
- Giesecke, T., Davis, B., Brewer, S., Finsinger, W., Wolters, S., Blaauw, M., ... Bradshaw, R. H. W. (2014). Towards mapping the late Quaternary vegetation change of Europe. *Vegetation History and Archaeobotany*, 23(1), 75–86. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0390-y>
- Gopar-Merino, L. F., y Velázquez, A. (2016). Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, (90), 75–88. <https://doi.org/10.14350/ig.46688>

- González-Solís, D., Quiñonez-Piñón, R., Luja-Molina, V. H., Arriola-Padilla, V., Barba-Macías, E., Cortés-Calva, P., ... Velázquez-Angulo, G. (2016). Herramientas y estrategias para el estudio y la conservación de los ecosistemas y su diversidad. In P. Balvanera, J. E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero y J. J. Schmitter-Soto (Eds.), *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* (pp. 341-346). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Islebe, G. A., Villanueva-Gutiérrez, R., y Sánchez-Sánchez, O. (2001). Relación Lluvia de Polen-Vegetación en Selvas de Quintana Roo. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, (69), 31–38.
- Israde-Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García, M. S., Bischoff, J., Domínguez Vázquez, G., y Garduño Monroy, V. H. (2010). Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 345–357.
- Lefebvre, K. (2017). La toponimia frente a la Arqueología y la Historia: aportes sobre la ocupación de la región de Acámbaro en el momento de la Conquista. In K. Lefebvre y C. Paredes-Martínez (Eds), *Memoria de los nombres: La toponimia en la conformación histórica del Territorio. De mesoamérica a México* (pp. 259-281). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lozano-García, S., Torres-Rodríguez, E., Ortega, B., Vázquez, G., y Caballero, M. (2013). Ecosystem responses to climate and disturbances in western central Mexico during the late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 370, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.12.006>
- Leverington, D. W., Teller, J. T., y Mann, J. D. (2002). A GIS method for reconstruction of late Quaternary landscapes from isobase data and modern topography. *Computers and Geosciences*, 28(5), 631–639. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00097-8)
- Mendoza, M. E., Granados, E. L., Geneletti, D., Pérez-Salicrup, D. R., y Salinas, V. (2011). Analysing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975–2003). *Applied Geography*, 31(1), 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.010>

- Ortega, B., Caballero, C., Lozano, S., Israde, I., y Vilaclara, G. (2002). 52 000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record. *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 663–675.
- Peinado-Lorca, M., Monje-Arenas L., y Martínez-Parras, J. Ma. (2008). *El paisaje vegetal de Castilla-La Mancha*. Castilla-La Mancha, España: Cuarto Centenario.
- Park, J., Byrne, R., Böhnell, H., Garza-Molina, R., y Conserva, M. (2010). Holocene climate change and human impact, central Mexico: a record based on maar lake pollen and sediment chemistry. *Quaternary Science Reviews*, 29(5–6), 618–632. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.10.017>
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Sáenz, S., y Penas-Merino, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1(1), 1–638. <https://doi.org/10.5616/gg110001>
- Flantua, S. G. A., Boxel, J. H., Hooghiemstra, H., y Smaalen, J. (2007). Application of GIS and logistic regression to fossil pollen data in modelling present and past spatial distribution of the Colombian savanna. *Climate Dynamics*, 29(7–8), 697–712. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0276-3>
- Sugita, S., Parshall, T., Calcote, R., y Walker, K. (2010). Testing the Landscape Reconstruction Algorithm for spatially explicit reconstruction of vegetation in northern Michigan and Wisconsin. *Quaternary Research*, 74(2), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.07.008>
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Figueroa-Rangel, B. L., Ortega-Guerrero, B., y Vázquez-Castro, G. (2012). Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(3), 764–778.
- Watts, W. A., y Bradbury, J. P. (1982). Paleoecological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Research*, 17(1), 56–70. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(82\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(82)90045-X)

