
ARTÍCULOS / ARTICLES

ALTITUD DEL LÍMITE SUPERIOR DE BOSQUE EN EL EJE NEOVOLCÁNICO MEXICANO, UN REFERENTE CLIMÁTICO DE LA ALTA MONTAÑA EN MÉXICO

Víctor Hugo Soto Molina

Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Tuxpan, Ver, México
visoto@uv.mx

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-1633-0752>

Juan Manuel Pech Canché

Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Tuxpan, Ver, México
jmpech@uv.mx

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8455-593X>

José Luís Alanís Méndez

Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Tuxpan, Ver, México
lalanis@uv.mx

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2140-7139>

Recibido: 09/11/2019; Aceptado: 05/02/2021; Publicado: 07/07/2021

Cómo citar este artículo/citation: Soto Molina, Víctor Hugo; Pech Canché, Juan Manuel y Alanís Méndez, José Luís (2021). Altitud del límite superior de bosque en el Eje Neovolcánico Mexicano, un referente climático de la alta montaña en México. *Estudios Geográficos*, 82 (290), e063. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202075.075>

RESUMEN: Se identificó el límite superior de bosque continuo y discontinuo en las montañas superiores a 4000 metros sobre el nivel del mar en México. El estudio se basó en el índice de vegetación de diferencia normalizada y mediante el análisis de componentes principales. Para el primer caso, se encontró que en cada vertiente el límite de bosque alcanza una altitud distinta; sin embargo, en promedio el bosque continuo culmina a 4019 y el discontinuo a 4072 msnm. Por su parte, el análisis estadístico permitió determinar que la precipitación, el tipo de suelo y la tasa de radiación solar a nivel de superficie son los principales factores que rigen su altitud. Finalmente se halló que el régimen de temperatura encontrado en esta frontera se aproxima a los valores estándares de la zona intertropical.

Palabras clave: Análisis de componentes principales; climatología de alta montaña; índice de vegetación de diferencia normalizada; límite superior de bosque; variabilidad climática.

Altitude of the forest upper limit in the Mexican Neovolcanic Axis, a climate reference for high-mountain environment in Mexico

ABSTRACT: The upper limit of continuous and discontinuous forest in mountains higher than 4000 meters above sea level in Mexico was identified. This study was based on the normalized difference vegetation index and by means of principal component analysis. For the first case, it was found that in each slope the forest limit reaches a different altitude; however, on average the continuous forest (timberline) ends at 4019 and the discontinuous forest (treeline) at 4072 masl. On the other hand, the statistical analysis made it possible to determine that precipitation, soil type and the rate of solar radiation at the surface level are the main factors that govern its altitude. Finally, it was found that the temperature regime found on this limit approximates the standard values of the intertropical zone.

Key words: Climatic variability; forest upper limit; high-mountain climatology; normalized difference vegetation index; principal components analysis.

INTRODUCCIÓN

El relieve mexicano es heterogéneo y muy accidentado. Más de dos terceras partes de su territorio está compuesto por regiones montañosas (Montero-García, 2004). Las principales provincias de montaña que posee son la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico; este último cruza de este a oeste el país en su parte central y se caracteriza por poseer las cimas más altas de la nación. Datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2017) señalan que 31 montañas superan los 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), y entre ellas el Iztaccíhuatl (5220 msnm), Popocatepetl (5500 msnm) y Citlaltépetl (5610 msnm) superan la línea de nieves perpetuas, la cual para el caso de México está próxima a los 5000 msnm. No obstante a que estos tres volcanes poseen glaciares o zonas de nieve perenne, existen otras siete montañas por arriba de 4000 msnm que presentan distintos grados de acumulación nival durante el invierno, esto como producto del clima característico de alta montaña y del arribo de masas de aire polar, frecuentes durante los meses de noviembre a marzo de cada año (Jáuregui, 1975).

Las condiciones de temperatura en las altas montañas tropicales, con un valor medio anual $\leq 5^\circ\text{C}$ rigen los constantes ciclos de helada muy recurrentes en altitudes superiores a los 4000 msnm. Este régimen térmico, desde la perspectiva mecánica, genera la crioclastia y favorece el flujo de escombros y la soliflucción en las laderas, que alteran o destruyen la vegetación juvenil de estas regiones de montaña (Hreško *et al.*, 2009; French, 2018). Los ciclos de congelamiento superficial también afectan la fisiología vegetal; Wieser y Tausz (2007) señalan que la deficiencia de calor altera el metabolismo, el crecimiento y la regeneración de los árboles. Estas condiciones negativas pueden ser incluso mayores ante la presencia de nieve estacional con meses de permanencia. La combinación de estas circunstancias, entre otros factores, limitan o impiden la germinación y el crecimiento de la vegetación (Hatfield y Prueger, 2015), determinando así el límite altitudinal del bosque; el cual al menos para las montañas tropicales, particularmente las mexicanas, coincide generalmente con una temperatura media anual del aire de $5\text{-}6^\circ\text{C}$ (Lauer y Klaus, 1975). Debido a que el régimen térmico del aire y el suelo están estrechamente correlacionados (Arya, 2001; Soto-Molina y Delgado-Granados, 2020), el suelo en el límite superior del bosque suele poseer un valor térmico anual de entre 6 y 7°C (Hoch y Körner, 2003) a ~ 20 cm de

profundidad; apenas un grado por encima del valor correspondiente al aire. Son estas condiciones térmicas, entre otros factores, las que regulan el límite superior del bosque en México.

Como se puede entender, el límite superior del bosque es un ecotono donde la vegetación arbórea lucha por subsistir, adaptándose a un entorno de condiciones extremas (Turunen y Latola, 2005). Por arriba de su límite, la vegetación maderable es sustituida por especies de matorrales que se presentan de forma aislada hasta alcanzar la cota que impide el total crecimiento vegetal; en el volcán Citlaltépetl, por ejemplo, esta frontera se localiza a ~ 4600 msnm (Lauer y Klaus, 1975; Soto-Molina y Delgado-Granados, 2020).

El cambio altitudinal del límite superior del bosque a lo largo del tiempo es un tema ampliamente documentado (Takahashi *et al.*, 2012; Vincze *et al.*, 2014; Schwörer *et al.*, 2014), sobre todo en el marco actual de cambios evidentes en las condiciones normales del clima (Kaczka *et al.*, 2015; Jandl *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018), en el que la variación de los patrones de temperatura y de precipitación obligan a que este límite se ubique cada vez a mayor altitud (Santaella, 2013), tal como sucede con la isoterma 0°C o línea de nieves perpetuas. Una temperatura en aumento favorece, en parte, el crecimiento y extensión del bosque (Wang *et al.*, 2006); y si el régimen de precipitación líquida supera al de la nieve, este avance altitudinal es aún más notorio. De este modo, el cambio altitudinal del límite de bosque funciona como un indicador más de cambio climático de mediano y largo plazo (Gaire *et al.*, 2017).

De acuerdo con Ward (1994) y Gellhorn (2002), de manera paralela a la línea de las nieves, el límite superior del bosque desciende de manera regular a partir del ecuador, donde alcanza una altitud de ~ 4500 msnm (Li, 1993), hasta llegar al nivel del mar en zonas circumpolares. No obstante, Holtmeier (2009) menciona que en el ecuador se forma un valle que está delimitado por las regiones de montañas subtropicales localizadas entre los 20° y 30° de latitud norte y sur, que es donde el límite de bosque alcanza su mayor altitud; a partir de estas crestas decrece hasta las zonas cercanas a los polos. Existen, sin embargo, algunas especies de *Polylepis*, que son beneficiadas a nivel de micro escala que pueden alcanzar una altitud de hasta 5400 msnm, como en el caso de Bolivia, marcando el límite superior de bosque más alto del planeta (Holtmeier, 2009). Por lo tanto, en términos generales, la latitud (Odland, 2015) es un factor que rige en gran medida el piso altitudinal del bosque. Al-

gunas aproximaciones sobre el gradiente latitudinal del bosque señalan variaciones que van desde los 71 (Malyshev, 1993) hasta 184 m (Arno, 1984) por cada grado de latitud.

El límite superior de bosque continuo, según Holtmeier (2009), está determinado por la densidad de la vegetación y la altura de los individuos que lo componen, independientemente de las especies que lo integren. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (ONUAA, 2010), para identificar áreas de bosque desde la perspectiva de cobertura, la densidad del dosel debe ser superior al 10% y extenderse en una superficie mayor a 0,5 hectáreas. Por su parte, la altura de los individuos que lo integran debe ser de por lo menos 2 m (Hofgaard, 1997). Sin embargo, la altura mínima requerida puede ser un tanto arbitraria ya que depende de cada especie que integra las distintas áreas boscosas del planeta. A este respecto, Aas y Faarlund (1996) señalan una altura mínima de 2,5 m para la especie *Betula tortuosa*; Kullman (1987) indica 5 m para *Pinus sylvestris*, o hasta 8 m para *Gynoxis* y *Hesperomel* (Salomons, 1986). Para el caso del bosque de gran altura en México, en el que según Gernandt y Pérez-de la Rosa (2014), existen familias como Pinacea y Cupressaceae, géneros como *Abies*, *Juniperus* y *Pinus*, su límite está compuesto principalmente por la especie *Pinus hartwegii* (Sánchez-González, 2008; Alfaro-Ramírez *et al.*, 2017; Steinmann *et al.*, 2019), aunque suelen encontrarse de forma intercalada individuos de *Abies religiosa* (Rzedowski, 2006); aquí el promedio mínimo de altura suele ser de 3-5 m.

Adicionalmente a las variables de temperatura y precipitación, existen otros factores ambientales que determinan la abundancia y distribución de las especies boscosas de alta montaña. La familia de *Pinus* obtiene mayor beneficio de un sustrato geológico compuesto por rocas ígneas; Rzedowski (2006) menciona que esto es debido a su mayor acidez, la cual se refleja en el tipo de suelos oscuros que la albergan (Aguilera *et al.*, 1962). La mayoría de los suelos de alta montaña de latitudes medias y bajas son relativamente jóvenes, ya que evolucionaron a partir del retroceso glacial del Holoceno (Holtmeier, 2009). De acuerdo con este autor, no existen estudios específicos de suelos en las montañas intertropicales, y la información habida es muy general. Por el contrario, en la región de los Alpes, donde se han realizado análisis a detalle, se han encontrado tipos de Andosoles, Regosoles, Cambisoles y Podzoles que están asociados a condiciones ambientales de micro escala. Con base en lo anterior, se puede señalar que no existe un suelo particular-

mente definido en los límites boscosos.

Conforme aumenta la altitud el espesor de la atmósfera y su densidad es menor, e influye en la tasa de radiación solar a nivel de superficie. La radiación UV (especialmente la tipo B) determina en buena medida las condiciones del bosque superior debido al estrés fisiológico que le ocasiona, lo cual se traduce en una adaptación débil de las especies (Turunen y Latola, 2005). Bader *et al.*, (2007) y Bader y Ruijten (2008) enfatizan lo anterior señalando que las bajas temperaturas, combinadas con un alto nivel de radiación solar resultan ser intolerables para las plántulas. Debido a que en el hemisferio boreal la mayor tasa de insolación se presenta en vertientes con dirección sur y oeste, la orientación del relieve y su pendiente tiene una influencia directa en la cantidad de radiación solar recibida en el suelo y por lo tanto, sobre la vegetación.

Otras variables, como la exposición a los vientos y la baja presión atmosférica son también elementos que determinan, aunque en menor medida que los anteriores, la presencia y la altitud del límite de bosque de montaña. Las laderas expuestas al viento experimentan mayor déficit de temperatura del suelo y del aire que los sitios mejor protegidos (Dahms, 1992); esto es principalmente ocasionado por la sensación térmica, la cual se relaciona con la velocidad del viento. Mecánicamente, la presión de viento y la abrasión también afectan el crecimiento vegetal (Holtmeier, 2009). La ausencia de materia orgánica en el suelo, como fuente de carbono, limita también su cota altitudinal (Cairns, 1998).

Debido a las características montañosas del relieve mexicano, y por la importancia del límite superior de bosque como indicador de cambio climático de mediano y largo plazo, este trabajo está enfocado en determinar el límite de bosque en las montañas mexicanas superiores a 4000 msnm. Este trabajo fortalece el conocimiento de las condiciones actuales de altitud del bosque de la alta montaña mexicana, el cual puede ser útil como referencia en temas de clima y vegetación de gran altura, no sólo en el país, sino también en otras regiones de montañas tropicales.

ÁREA DE ESTUDIO

El Eje Neovolcánico es una franja de montañas y mesetas ubicada alrededor de los 19,5° de latitud norte. Su longitud es de ~900 km, posee un ancho promedio de 150 km y cruza el país de este a oeste abarcando distintos estados, entre éstos la capital de la nación.

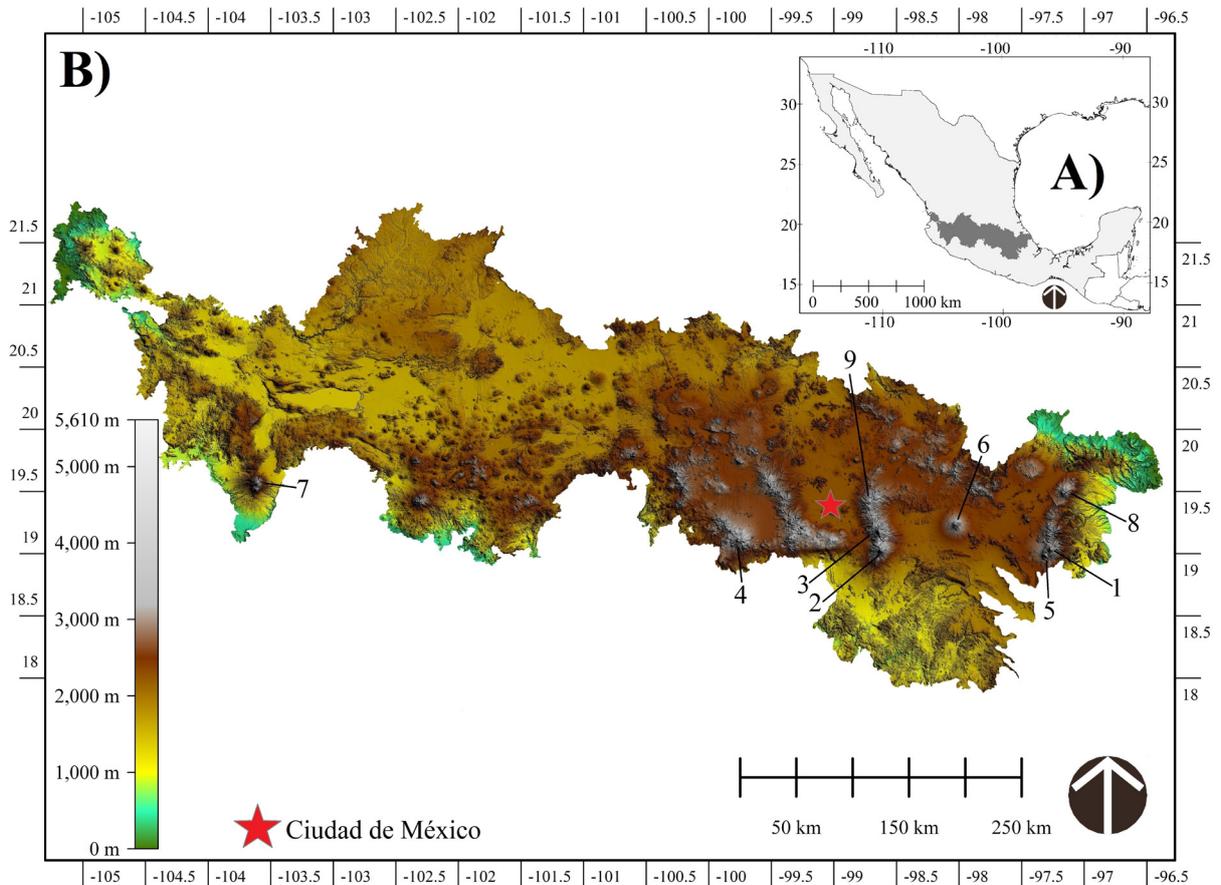
En su interior se localizan las cimas más altas del país que están separadas por altiplanicies que poseen una altitud media de 2000 msnm. Está integrado por distintos volcanes monogenéticos y estratovolcanes. Algunos están extintos, otros en etapa de reposo y otros más en fase de actividad eruptiva, como el volcán de Fuego de Colima y el Popocatepetl. De acuerdo con Demant (1978), la edad de esta franja volcánica está datada dentro del periodo Plio-Cuaternario; aunque para Ferrari *et al.*, (2012) existen indicios de evolución a partir de principios del Mioceno, hace ~19 millones de años. El lecho rocoso en sus partes más altas está compuesto en su mayoría por dacitas, andesitas y riolitas, producto de los distintos episodios eruptivos a lo largo de su historia.

El clima es variado en función de la continentalidad y de la altura del relieve. Con base en García (2004), en las partes próximas a las costas, donde la humedad oceánica influye de forma directa, varía desde semi-cálido con un alto índice pluvial en altitudes inferiores a 800 msnm, con una temperatura media anual que oscila entre 18 y 22°C. Por encima de esta altitud

inicia la presencia de bosque mesófilo con un clima templado y húmedo que culmina hasta los ~2000 msnm. La temperatura anual de esta zona es inferior a 18°C y hay registros pluviales, aunque de manera aislada, que llegan a alcanzar hasta 4500 mm al año; sin embargo, el resto de este rango altitudinal posee una media de 2500 mm. Más arriba de esta cota la temperatura disminuye y también el régimen de precipitación. Aquí se inicia generalmente el bosque de pino-encino que alcanza cotas cercanas a 3400 msnm y el de pino limita a ~4100 en función de distintos rasgos topo-climáticos. El clima es de tipo semifrío con una temperatura media anual de 8°C. La precipitación alcanza valores comúnmente menores a 1200 mm al año. Los climas fríos de tundra o de hielos perpetuos se inician por arriba de este límite; el primero de estos posee un régimen térmico que oscila entre -2 y 5°C; su límite se ubica aproximadamente a 4000 msnm. Por su parte, el clima más frío de todos se localiza a ~5100 msnm con un valor térmico anual inferior a -2°C. Por otro lado, las regiones de altiplanicie, ubicadas en el centro del Eje Neovolcánico y alejadas de la influencia

FIGURA1

ZONA DE ESTUDIO



oceánica son en su mayoría de clima templado con una temperatura media anual de 18 a 22°C pero con menor cantidad de precipitación en comparación con las zonas de montaña. En las mesetas centrales existen también amplias áreas que poseen climas secos de estepa; en parte esto es consecuencia de los vientos catabáticos que dan origen al efecto Foehn en regiones adyacentes a zonas de montaña.

La figura y la tabla 1 señalan la distribución de las montañas que superan los 4000 msnm con sus altitudes correspondientes según información del INEGI

TABLA 1
MONTAÑAS SUPERIORES A 4000 MSNM

Lugar en altitud	Montaña	Altitud	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	Citlaltépetl	5610	19°02'00"	97°16'12"
2	Popocatepetl	5500	19°01'21"	98°37'39"
3	Iztaccíhuatl	5220	19°11'00"	98°38'36"
4	Xinantécatl	4680	19°06'19"	99°46'09"
5	Sierra Negra	4580	18°59'05"	97°19'00"
6	Matlalcuéyatl	4420	19°14'00"	98°02'00"
7	Nevado de Colima	4260	19°33'45"	103°36'31"
8	Naucampatépetl	4200	19°29'04"	97°09'37"
9	Tláloc	4120	19°24'44"	98°42'45"
10	Tacaná*	4080	15°07'56"	92°06'30"

*No considerada en el estudio debido a su latitud.

Fuente: elaboración propia.

(2017).

Es importante señalar que el volcán Tacaná (número 10) no ha sido tomado en cuenta en este estudio debido a que, no obstante su altitud de 4080 msnm, su ubicación a 15° de latitud ocasiona que su cima se encuentre cubierta por bosque de pinos, enfatizando con esto la teoría del gradiente latitudinal de la línea de bosque previamente señalado.

FUENTES Y METODOLOGÍA

Los sensores remotos son una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad para el estudio de la superficie terrestre y su vegetación, entre otros elementos ambientales. Para observar las condiciones de la vegetación, y de manera particular delimitar la línea de bosque, es muy recurrido el uso de imágenes satelitales de distintos sensores como AVHRR (Kogan *et al.*, 2003), Modis (Danzeglocke, 2005), Aster (Sitko y Troll, 2008), y más comúnmente los de la serie Landsat (Nelson *et al.*, 2009; Bharti *et al.*, 2011; Braunisch *et al.*, 2016) entre otros. Sin embargo, debido a su mayor resolución espacial (10 m por pixel en las bandas 2 a 8), las imágenes Sentinel-2 (A y B) son de momento las que ofrecen mayor precisión en los resultados dentro

de las imágenes de acceso gratuito. Una más de las ventajas ofrecidas por la serie de imágenes Sentinel-2, radica en que su nivel de procesamiento (a partir del nivel 1C) posee correcciones radiométricas y geométricas que incluyen orto-rectificación y registro espacial en un sistema de referencia global con precisión de subpíxel (ESA, 2015). No obstante lo anterior, para esta investigación se realizó un nuevo procesamiento de corrección radiométrica a la base de la atmósfera mediante la herramienta Sen2cor del programa SNAP, de la Agencia Espacial Europea (ESA), para lograr una mayor precisión mediante la eliminación del efecto de aberración causado por los aerosoles atmosféricos (Li *et al.*, 2018).

Por otra parte, el empleo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI en inglés) es un parámetro muy utilizado para identificar la calidad de la vegetación y su densidad (Zaitunah *et al.*, 2018); adicionalmente permite distinguir la cobertura vegetal del suelo desnudo, ya que una de sus ventajas radica en la facilidad de cuantificar las diferencias representadas mediante cada pixel (Singh *et al.*, 2012). Su rango va de -1 a +1, siendo los valores cercanos al -1 los correspondientes a los cuerpos de agua, y los valores próximos a 0 representan el suelo desnudo. Los valores positivos indican las diferentes cualidades de la vegetación; un valor cercano a +1 indica la presencia de una vegetación vigorosa y densa. De este modo, en una imagen de alta resolución espacial, como las Sentinel-2 en este caso, cada pixel de 10x10 m representaría el dosel forestal con algunos metros de cobertura. Dadas estas propiedades de resolución, en este trabajo se elaboró un mosaico de imágenes Sentinel-2A correspondiente al mes de abril del 2019 con el que se cubrieran las montañas mayores a 4000 msnm dentro del Eje Neovolcánico. Las imágenes fueron obtenidas de la plataforma Earth Explorer de la USGS (2019) de Estados Unidos. Se procuró obtener la serie de imágenes más recientes dentro del período de estiaje con la finalidad de que estuvieran libres de nubosidad, así como también para evitar la sobreestimación ocasionada por el exceso de humedad durante la temporada de lluvias. De este modo, la tabla 2 muestra las imágenes seleccionadas para este trabajo.

Para el cálculo del NDVI, las imágenes fueron procesadas dentro del programa Global Mapper v. 20 a través de la combinación de las bandas 4 y 8 (Delegido *et al.*, 2016; Arekhi *et al.*, 2019) mediante el algoritmo $\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$. Donde la banda 4 corresponde a la región espectral del rojo (Red) y la banda 8 al infrarrojo cercano (NIR); ambas con resolución espacial de 10 m por pi-

TABLA 2
CONJUNTO DE IMÁGENES SENTINEL-2A EMPLEADAS
PARA EL CÁLCULO DEL NDVI

Imagen	Fecha de la toma
T13QFB_20190423T171901	23 de abril 2019
T14QMG_20190412T165849	12 de abril 2019
T14QNG_20190412T165849	12 de abril 2019
T14QPG_20190330T164859	30 de marzo 2019

Fuente: elaboración propia.

xel. Una vez generada la capa del NDVI, se consideró que la cobertura de píxeles que fuera superior al 10% del área, según el criterio de la ONUAA (2010), corresponderían a zonas de bosque continuo (timberline en inglés). De esta manera, la posición más alta con respecto al relieve, que tuviera una cobertura de píxeles superiores al 10% del área correspondiente señaló el límite altitudinal del bosque continuo. La cobertura inferior al 10%, por su parte, representó los parches discontinuos o individuos aislados del bosque (treeline en inglés).

De las capas ráster resultantes se eliminaron los valores que correspondieron al lecho rocoso y suelo desnudo ($NDVI \leq 0$) y de vegetación de baja densidad ($0 < NDVI < 0,3$), pertenecientes a la vegetación no arbórea, para que los píxeles correspondientes a la vegetación forestal, por arriba del valor de 0,3 (Reddy y Reddy, 2013; Malini y Somashekar, 2013; Zaitunah *et al.*, 2018) quedaran aislados. Posteriormente esta capa se sobrepuso a un modelo digital de elevaciones (MDE) de 15 m de resolución que fue obtenido de la página oficial del INEGI (2019), para identificar la altitud a la que se ubicaran los píxeles de vegetación; determinando así la altitud máxima de la línea de bosque continuo o timberline para cada una de las

vertientes norte, sur, este y oeste de todas las montañas analizadas. De igual manera, se determinó la altitud máxima alcanzada por individuos aislados, lo que supuso el límite superior de bosque discontinuo (treeline).

Para identificar el grado de incidencia de los factores ambientales que condicionan la altitud de la línea superior de bosque, se elaboró un análisis de componentes principales por medio del programa SPSS v. 23, mediante el cual se correlacionaron las variables de 1. Orientación, 2. Temperatura, 3. Precipitación, 4. Lecho rocoso, 5. Tipo de suelo, 6. Evaporación y 7. Radiación. La utilidad del análisis de componentes principales se basa en la capacidad de identificar relaciones generando combinaciones lineales de variables que muestran tendencias comunes de variación, y puede contribuir sustancialmente al reconocimiento de patrones en el comportamiento de los datos analizados (Peres-Neto *et al.*, 2005). Para los casos de temperatura, precipitación y evaporación, se consideraron los valores medios anuales, obtenidos de la plataforma digital de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2019), al igual que las capas de roca y de suelo. Los valores de temperatura, precipitación y evaporación anuales fueron determinados a la altitud de 4000 msnm. Por su parte, el cálculo de la radiación solar incidente en superficie, también a escala anual, se obtuvo mediante la herramienta *solar radiation* del programa ArcGIS v. 10.4 y el MDE. La radiación solar incidente se calculó a 4000 msnm en pendientes de 15° para los acimuts 0°, 90°, 180° y 270°, que corresponde a los cuatro puntos cardinales.

El factor latitud no fue considerado en este trabajo debido a que todas las montañas analizadas oscilan al-

TABLA 3
VARIABLES Y RANGOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Tipo principal de roca	Tipo principal de suelo	Precipitación anual (mm)	Temperatura anual (°C)	Radiación solar (W/m ² /hr)	Evaporación (mm)	Orientación (Grados)
Toba ácida	Regosol éutrico	700	5,0	238	550	315-45
Brecha volcánica intermedia	Andosol ócrico	900	5,3	267	600	45-135
Brecha sedimentaria	Regosol dístrico	1000	5,5	258	650	135-225
Andesita	Litosol	1100	5,8	252	700	225-315
	Cambisol éutrico	1350	6,3		750	
	Andosol húmico	1225	7,0			
		1650	8,0			
			9,0			
			10,0			
			11,0			

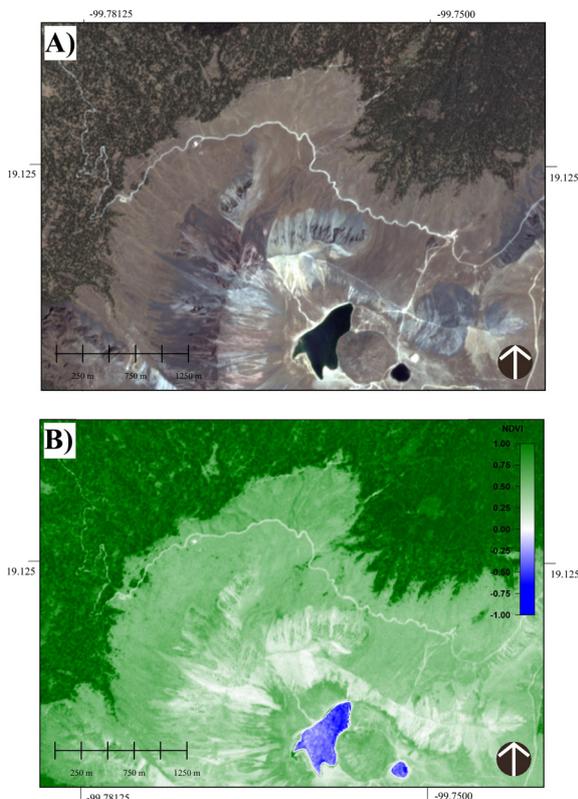
Fuente: elaboración propia.

rededor de los 19° y se encuentran relativamente muy próximas entre sí, por lo que, si bien está documentada su influencia en el límite altitudinal de la vegetación, en este caso su variabilidad entre una montaña y otra no representa diferencias significativas. Por lo tanto, considerando los elementos mencionados, se pudieron identificar los principales factores que pudieran determinar la posición del límite de bosque en cada una de las cuatro vertientes de las montañas del Eje Neovolcánico. La tabla 3 muestra los distintos parámetros que componen cada una de las variables analizadas.

RESULTADOS

Mediante el procedimiento para la obtención del NDVI, la figura 2 muestra un acercamiento a la imagen satelital en color verdadero (RGB) de la parte norte del volcán Xinantécatl (figura 2 A), así como los valores correspondientes del NDVI (figura 2 B). La comparación NDVI-RGB ha sido empleada en la mayoría de los estudios de cobertura forestal para fines de corrobora-

FIGURA 2
IMAGEN SENTINEL-2A EN RGB (A) Y DEL NDVI (B) EN LA ZONA NORTE DEL VOLCÁN XINANTÉCATL. LOS VALORES MENORES A 0 PERTENECEN A CUERPOS DE AGUA EN EL INTERIOR DE CRÁTER

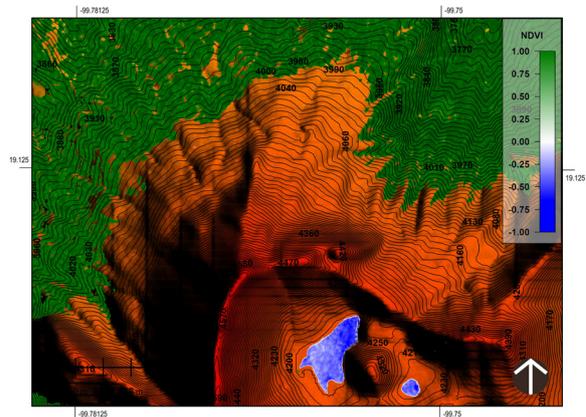


ción (Sader y Winne, 1992).

En la figura 2 se aprecia con nitidez cómo los píxeles de 10 x 10 m del NDVI corresponden respectivamente a cada uno de los de la imagen RGB, en la que se representa la vegetación pinécea. Por lo tanto, debido al contraste entre píxeles de vegetación densa y del suelo desnudo, puede observarse con claridad el límite superior del bosque.

Tras la extracción de píxeles con valor superior a 0,3 del NDVI, la figura 3 señala la capa de cobertura de bosque continuo, la cual se ha sobrepuesto a un MDE

FIGURA 3
CAPA DE COBERTURA DE BOSQUE CONTINUO SOBRE EL MDE. LAS ISOHIPSAS, COMO REFERENCIA, ESTÁN EN INTERVALOS DE 10 METROS. LOS VALORES DE NDVI POR DEBAJO DE -0.25 CORRESPONDEN A LOS LAGOS DEL SOL Y LA LUNA, EN EL CRÁTER DEL VOLCÁN



en que se observan los valores de altitud en los que se posiciona el límite superior.

En la figura 3 puede apreciarse con claridad la cota altitudinal que alcanza el bosque continuo y los individuos aislados conforme al MDE. Este ejemplo corresponde a la vertiente norte del volcán Xinantécatl. Pueden observarse también porciones de vegetación no arbórea ($NDVI \leq 0,3$), probablemente de tipo pastizal, o que corresponden a suelo desnudo ($NDVI \sim 0$) entre el bosque de pinos. Una vez elaborados los procedimientos anteriores para las nueve montañas del Eje Neovolcánico, la tabla 4 muestra los valores de altitud por vertiente, así como los valores promedios para la cubierta continua y discontinua de bosque.

Con base en el resumen de la tabla 4, se tiene entonces que los límites superiores de bosque son distintos para cada ladera; de igual manera, su altitud es diferente en cada una de las montañas. Puede obser-

TABLA 4
ALTITUD DEL LÍMITE SUPERIOR DE BOSQUE CONTINUO Y DISCONTINUO POR VERTIENTE

Lugar en altitud	Montaña	Vertiente	Discontinuo	Promedio	Continuo	Promedio
1	Citlaltépetl	norte	4100	4117,5	4030	4047,5
		sur	4200		4120	
		este	4130		4060	
		oeste	4040		3980	
2	Popocatepetl	norte	4030	3985	4010	3935
		sur	4020		3980	
		este	4010		3910	
		oeste	3880		3840	
3	Iztaccíhuatl	norte	4190	4170	4150	4122,5
		sur	4150		4130	
		este	4200		4170	
		oeste	4140		4040	
4	Xinantécatl	norte	4100	4112,5	4090	4090
		sur	4130		4070	
		este	4110		4110	
		oeste	4110		4090	
5	Sierra Negra	norte	4020	4102,5	3950	4035
		sur	4170		4080	
		este	4240		4210	
		oeste	3980		3900	
6	Matlalcuéyatl	norte	4040	4055	4020	4002,5
		sur	4050		3990	
		este	4060		4050	
		oeste	4070		3950	
7	Nevado de Colima	norte	3900	3982,5	3860	3925
		sur	3990		3900	
		este	4050		3970	
		oeste	3990		3970	
8	Naucampatépetl	norte	4070	4062,5	4000	3987,5
		sur	4050		4010	
		este	4060		3900	
		oeste	4070		4040	
9	Tlálóc	norte	4040	4060	4030	4025
		sur	4100		4030	
		este	4080		4040	
		oeste	4020		4000	
Altitud media por vertiente		norte	4054.5	4072	4015.5	4018,9
		sur	4095.5		4034.4	
		este	4104.5		4046.7	
		oeste	4033.3		3978.9	

Fuente: elaboración propia.

varse que el límite más bajo, en promedio, corresponde a las laderas oeste, con 4033,3 y 3978,9 msnm para el bosque discontinuo y continuo, respectivamente. Por su parte, las vertientes este son las que poseen un límite superior más alto, con 4104,5 msnm para el bosque discontinuo y 4046,7 para el bosque conti-

nuo. De manera individual, la montaña con mayor altitud de cobertura boscosa es el Iztaccíhuatl, con 4170 msnm para la cubierta aislada y 4122,5 para el bosque continuo. Contrariamente, en el Nevado de Colima se encontró una altitud de 3982,5 y 3925 msnm para el bosque aislado y el continuo, respectivamente.

Por su parte, el análisis de componentes principales permitió identificar los factores que condicionan la altitud del límite del bosque. De acuerdo con la prueba de significancia de la tabla 5, se observa que existe un grado de explicación no muy alto (0,532) pero con alto

TABLA 5
PRUEBA DE SIGNIFICANCIA SEGÚN TEST DE ESFERICIDAD DE BARTLETT

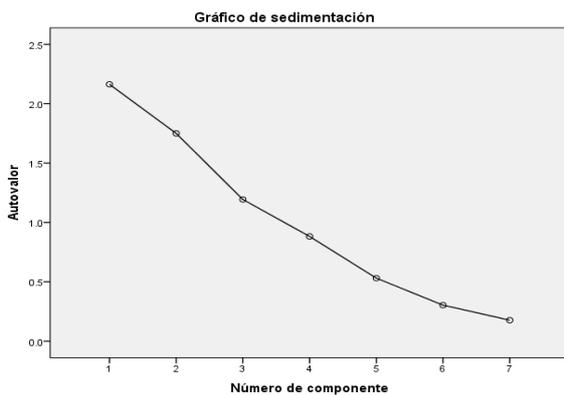
Prueba de KMO y Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0,532
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	69,262
	gl	21
	Sig.	0,000

Fuente: elaboración propia.

nivel de significancia según la prueba de esfericidad de Bartlett, considerando un valor alfa de 0,05.

Mediante los resultados de la tabla 6 se determinó

FIGURA 4
IDENTIFICACIÓN DEL NÚMERO DE COMPONENTES QUE CONDICIONAN LA ALTITUD DEL LÍMITE SUPERIOR DEL BOSQUE



que son tres componentes principales los que condicionan la altitud del límite del bosque, que en conjunto alcanzan a explicar el fenómeno en un 73%.

Lo anterior es mostrado en el gráfico de sedimentación (figura 4), donde se observa que al menos tres componentes superan el umbral de auto valor 1.

Analizando cada uno de los componentes, según las variables con mayor nivel de incidencia (tabla 7), se puede determinar, de mayor a menor grado de importancia, que el factor principal, componente 1, está compuesto por la variable de precipitación, seguida por la del tipo de

TABLA 7
NIVEL DE CONDICIONAMIENTO, SEGÚN LOS FACTORES IDENTIFICADOS

Matriz de componente rotado ^a	Componente		
	1	2	3
PRECIPITACIÓN	0,901		
SUELO	0,792		0,322
EVAPORACIÓN	0,594	0,240	-0,140
RADIACIÓN		0,942	0,103
ORIENTACIÓN		-0,927	
ROCA	0,285		0,813
TEMPERATURA	-0,394	0,191	0,646

Método de extracción: análisis de componentes principales.
Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.^a

a. La rotación ha convergido en 5 iteraciones.

Fuente: elaboración propia.

suelo; siendo éstos los elementos más determinantes en la altitud del bosque, seguido por el grado de radiación solar incidente como factor determinante 2. En menor medida influye el tipo de roca y la temperatura.

De manera gráfica, la figura 5 muestra la posición de cada factor que interviene en el ejercicio, según su grado de importancia y su nivel de intensidad.

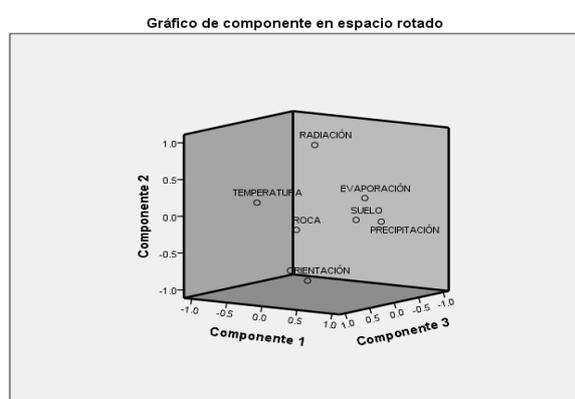
TABLA 6
PORCENTAJE DE EXPLICACIÓN POR LOS TRES COMPONENTES PRINCIPALES

Varianza total explicada									
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado			Sumas de rotación de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	2,164	30,907	30,907	2,164	30,907	30,907	2,041	29,153	29,153
2	1,750	25,001	55,908	1,750	25,001	55,908	1,850	26,429	55,582
3	1,193	17,045	72,953	1,193	17,045	72,953	1,216	17,371	72,953
4	0,882	12,601	85,553						
5	0,531	7,585	93,139						
6	0,303	4,335	97,474						
7	0,177	2,526	100,000						

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5
GRÁFICA DE DISPERSIÓN TRIDIMENSIONAL POR COMPONENTE



DISCUSIÓN

La altitud del límite bosque en México depende de la combinación de distintos factores que influyen de diferente manera en cada montaña del país; esto, aunado a la información no detallada de las variables medioambientales que intervienen en su delimitación, limitan la identificación precisa de los factores condicionantes. Con base en lo anterior, este trabajo resalta la necesidad de realizar análisis a detalle *in situ* para conocer las propiedades particulares de las variables aquí estudiadas para cada una de las montañas mexicanas superiores a 4000 msnm. Es probable que la respuesta del modelo de componentes principales (KMO = 0,532) se deba a la carencia de información más detallada de las variables analizadas. No obstante lo anterior, el alto nivel de significancia, según la prueba de Bartlett, con este trabajo se encontró que el límite altitudinal del límite de bosque en México depende principalmente de la precipitación, seguido del tipo del suelo y del grado de radiación solar a nivel de superficie.

En principio el factor precipitación, como elemento vital, queda de manifiesto en este trabajo al ser identificado como el más influyente en la determinación del límite altitudinal del bosque. Las propiedades físico-químicas del suelo es el segundo elemento condicionante como lo señalan Aguilera *et al.*, (1962). El tercer condicionante, la radiación solar, es también constatado por Turunen y Latola (2005), Bader *et al.*, (2007) y Bader y Ruijten (2008). Las características del lecho rocoso y la temperatura del aire son factores que influyen en el alcance vertical de la vegetación arbórea pero en menor medida que los anteriores. Debido a la estrecha relación evolutiva entre la roca y el suelo, se entiende entonces que el lecho rocoso adquiere

importancia como elemento determinante del límite superior arbóreo, sólo a través del tiempo y mediante su meteorización y transformación en suelos más fértiles, con la combinación de materia orgánica de origen vegetal, así como por los depósitos de ceniza volcánica. Por su parte, la variable de temperatura, si bien queda identificada también dentro del tercer componente y con el menor grado de incidencia, permite dejar en claro que la radiación solar a nivel de superficie, desde la perspectiva de la micrometeorología, es el componente atmosférico que determina la temperatura del suelo y como consecuencia del aire, mediante los flujos de calor sensible; esto dentro del balance de energía superficial, tal como lo manifiesta Arya (2001). Por lo tanto, la temperatura y el tipo de roca están estrictamente vinculados a la radiación solar y el tipo de suelo, respectivamente.

Los valores de altitud en la línea de bosque encontrados en este trabajo están estrechamente correspondidos con aquellos presentes en regiones intertropicales del planeta; es decir, entre el rango de 4000-4200 msnm. Las diferencias entre el límite de bosque continuo y el discontinuo, las cuales van desde 22 a 75 metros en promedio, se encuentran dentro del valor medio de la región intertropical del hemisferio norte como lo menciona Autio (2006); por lo que al menos para las regiones boreales intertropicales, los parámetros hallados en este trabajo podrían representar la referencia más actualizada.

La diferencia en la altitud de la línea de bosque cercana a 200 m entre los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, a pesar de la cercanía entre ellos (14 km), debe ser una consecuencia de los distintos estados de actividad volcánica que poseen. Mientras que el Iztaccíhuatl está considerado en etapa de reposo (Macías *et al.*, 2012) o incluso ha sido señalado como extinto (Mooser, 1958), el Popocatepetl ha permanecido activo recientemente, en un estado de constantes episodios eruptivos desde el año 1994 (Martin-Del Pozzo, 2012). Los flujos piroclásticos y de lava, principalmente, aunado con el alto calor geotérmico pueden ser los causantes del impedimento en la elevación de la línea de bosque en este edificio volcánico. Situaciones semejantes ocurren con el Nevado de Colima, perteneciente al Complejo Volcánico Colima que es considerado actualmente como el complejo más activo del país (Norini *et al.*, 2010). Las situaciones relativamente similares de actividad volcánica entre estas dos montañas condicionan que la altitud máxima para el bosque continuo y discontinuo sea muy semejante entre ellos.

Es probable que la mayor altitud del límite superior de bosque alcanzada en las vertientes orientales de todas las montañas estudiadas se deba en buena medida a las corrientes de los vientos alisios que traen consigo humedad proveniente del Golfo de México (Jáuregui, 1975). Esta humedad contenida en el aire algunas veces es depositada directamente en la vegetación y sobre el suelo, favoreciendo su hidratación. Adicionalmente, los vientos alisios y su humedad contenida sufren un forzamiento ascendente en las laderas del este que propicia su condensación, dando pie a la precipitación de tipo orográfico, beneficiando una vez más la hidratación vegetal. En las vertientes occidentales por su parte, donde se registra la altitud más baja de la línea de bosque de las cuatro vertientes, puede ser una consecuencia de la alta tasa de radiación solar justo después del mediodía, ocasionando el estrés fisiológico de la vegetación en combinación con las bajas temperaturas, tal como lo manifiestan Bader *et al.*, (2007) y Bader y Ruijten (2008). Adicionalmente, debido a que la precipitación de tipo orográfico ocurre mayormente en las vertientes orientales, donde inciden los alisios, al cruzar la barrera orográfica estos vientos descienden por las laderas occidentales mayormente secos, propiciando el contraste de humedad entre ambas vertientes y la consecuente diferencia de hidratación vegetal.

Desde la perspectiva climática, el patrón de distribución de altitud máxima del límite de bosque parece obedecer condiciones de temperatura y precipitación relativamente semejantes entre las montañas analizadas. Sin embargo, el régimen térmico muestra valores un tanto menos homogéneos en comparación con la variable pluvial. Mientras que el modelo de distribución de la precipitación en regiones mexicanas de alta montaña, elaborado por Soto-Molina *et al.*, (2020), indica una disminución cuasi lineal en función de la altura por arriba de 3000 msnm, con una precipitación anual acumulada inferior a 1000 mm entre 4000 y 4100 msnm, la variable térmica por su parte, muestra un comportamiento distinto. De acuerdo con datos de temperatura media del aire en el volcán Citlaltépetl, reportados por Soto-Molina y Delgado-Granados (2020), el límite medio de individuos aislados (bosque discontinuo) coincide con un valor de 6.7°C y registra un número de 101 ciclos diurnos de helada al año. Por su parte, a partir de los registros de la estación San Juan Tetela (3393 msnm) y del gradiente altitudinal de temperatura determinado por Soto y Delgado (2020), en el volcán Iztaccíhuatl el mismo límite muestra una temperatura de 6.2°C; a esta cota Andrés *et al.*, (2010) reportan 56 ciclos de helada a nivel del suelo. Final-

mente en el volcán Xinantécatl, a partir de la estación Nevado de Toluca (4283 msnm) y del gradiente térmico estimado (Soto y Delgado, 2020), el límite máximo altitudinal del bosque se posiciona sobre la isoterma 5.1°C; los registros de la estación climatológica señalan 170 ciclos de helada al año.

Con base en lo anterior se enfatiza que el régimen térmico afecta la fisiología de la vegetación e impide su crecimiento, como lo señalan Wieser y Tausz (2007) y Hatfield y Prueger (2015). Los valores de temperatura, si bien son un tanto distintos entre las montañas mencionadas, justificando en parte su posición dentro de los factores que determinan la altitud del bosque, se aproximan al correspondiente de 5°C señalado por Lauer y Klaus (1975) como frontera superior del bosque en las montañas tropicales. No obstante lo anterior, al combinarse la temperatura con la variable de precipitación, identificada ésta como el componente más determinante, y aunado también a la tasa de insolación, se robustece la hipótesis de que el clima, como conjunto de variables, es el que rige principalmente la altitud del límite de bosque en las montañas mexicanas.

CONCLUSIONES

Los límites de bosque continuo y discontinuo en las montañas mexicanas son producto, en orden de importancia, de la precipitación, el tipo de suelo y de la incidencia de la radiación solar; en menor medida influye el basamento rocoso y la temperatura del aire. La altitud del límite de bosque en México se ubica dentro del rango correspondiente para las altas montañas intertropicales. La humedad del Golfo de México, transportada por los vientos alisios, determina que en las laderas orientales alcancen la cota más alta.

Se requiere de estudios futuros a nivel de micro escala para identificar con mayor precisión los factores que rigen la altitud del límite continuo y discontinuo del bosque en México. No obstante lo anterior, los resultados encontrados en este trabajo serán un buen referente desde la perspectiva forestal y climática para estudios posteriores donde se aborden los impactos del cambio climático en ecosistemas de alta montaña.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero durante la estancia posdoctoral que facilitó este trabajo.

A la Maestría en Ciencias del Ambiente de la Universidad Veracruzana, campus Poza Rica-Tuxpan por la estancia posdoctoral.

BIBLIOGRAFÍA

- Aas, B. and Faarlund, T. (1996). The present and the Holocene birch belt in Norway. *Paläo-klimaforschung* (20), 19-42.
- Aguilera, N., T. M. Dow and R. Hernández S. (1962). Suelos, problema básico en silvicultura. En: FAO (Ed.) *Seminario y viaje de estudio de coníferas latinoamericanas*. (pp. 108-140). México, D. F., México: Inst. Nac. Invest. Forest.
- Alfaro-Ramírez, F. U., Arredondo-Moreno, J. T., Pérez-Suárez, M., and Endara-Agramont, Á. R. (2017). *Pinus hartwegii* Lindl. treeline ecotone: structure and altitudinal limits at Nevado de Toluca, Mexico. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 261-273. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.10.055>
- Andrés, N., Estremera, D. P., Zamorano, J. J., y Vázquez-Selem, L. (2010). Distribución del permafrost e intensidad de los procesos periglaciares en el estratovolcán Iztaccíhuatl (México) 1. *Eria*, (83), 291-310.
- Arekhi, M., Goksel, C., Balik Sanli, F., and Senel, G. (2019). Comparative Evaluation of the Spectral and Spatial Consistency of Sentinel-2 and Landsat-8 OLI Data for Igneada Longos Forest. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 56. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020056>
- Arno, S. F. (1984). *Timberline, mountain and arctic frontiers*. Seattle, WA., USA: The Mountaineers, 310 pp.
- Arya, P. S. (2001). *Introduction to micrometeorology* (Vol. 79). Seattle, WA., USA: Academic Press, 420 pp.
- Autio, J. (2006). *Environmental factors controlling the position of the actual timberline and treeline on the fells of Finnish Lapland*. Oulu, Finland: OULU University Press, 63 pp.
- Bader, M. Y. and Ruijten, J. J. A. (2008). A topography-based model of forest cover at the alpine treeline in the tropical Andes. *J. Biogeogr.* (35), 711–723. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01818.x>
- Bader, M. Y., van Geloof, I. and Rietkerk, M. (2007). High solar radiation hinders tree regeneration above the alpine treeline in northern Ecuador. *Plant Ecol.* (191), 33–45. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9212-6>
- Bharti, R. R., Rai, I. D., Adhikari, B. S., and Rawat, G. S. (2011). Timberline change detection using topographic map and satellite imagery: a critique. *Tropical Ecology*, 52(1), 133-137.
- Braunisch, V., Patthey, P., and Arlettaz, R. (2016). Where to combat shrub encroachment in alpine timberline ecosystems: combining remotely sensed vegetation information with species habitat modelling. *PloS one*, 11(10), e0164318. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164318>
- Cairns, D. M. (1998). Modeling controls on pattern at alpine treeline. *Geogr. Environ. Model.* 2 (1), 43–63.
- Chen, B. X., Sun, Y. F., Zhang, H. B., Han, Z. H., Wang, J. S., Li, Y. K., and Yang, X. L. (2018). Temperature change along elevation and its effect on the alpine timberline tree growth in the southeast of the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 9(3), 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.05.001>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO (8 de agosto de 2019). *Portal de geoinformación. Sistema nacional de información sobre biodiversidad*. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/topog/infgrt/indi50kgw
- Dahms, A. (1992). Wachstumsbedingungen bei *Picea engelmannii* (Parry) Engelm. und *Abies lasiocarpa* (Hook) Nutt. an unterschiedlich windexponierten Standorten im Waldgrenzbereich der Colorado Front Range, U.S.A. Diss. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster.
- Danzeglocke, J. (2005). Remote sensing of upper timberline elevation in the Alps on different scales. In *proc. 24th EARSeL Symp. New Strategies for European Remote Sensing*. 25-27th May 2004.
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz, A., Pereira, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G. and Sanchis, J. (2016). Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales. In *Conference: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota Y Sistemas de Información Geográfica (SELER)*. Puerto Iguazú, Argentina.

- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172-187.
- European Space Agency, ESA (2015). Sentinel-2 User Handbook. Issue 1 Rev. 2. 64 pp.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., and Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122-149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- French, H. M. (2018). *The periglacial environment (4th edition)*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. 513 pp.
- Gaire, N. P., Koirala, M., Bhujju, D. R., and Carrer, M. (2017). Site-and species-specific treeline responses to climatic variability in eastern Nepal Himalaya. *Dendrochronologia*, 41, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.03.001>
- García, E. (2004). "Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)" 5ª edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. (No. C/551.6972 G3/2004), 90 pp.
- Gellhorn, J. (2002). *Song of the alpine: The Rocky Mountain tundra through the seasons*. Boulder, Co. USA: Big Earth Publishing. 263 pp.
- Gernandt, D. S., and Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 126-133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Hatfield, J. L., and Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hoch, G. and Körner, C. (2003). The carbon charging of pines at the climatic treeline: A global comparison. *Oecologia*, (135), 10-21. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1154-7>
- Hofgaard, A. (1997). Structural changes in the forest-tundra ecotone: a dynamic process. In *Past and future rapid environmental changes* (pp. 255-263). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60599-4_20
- Holtmeier, F. K. (2009). *Mountain timberlines: ecology, patchiness, and dynamics* (Vol. 36). Geneva, Switzerland: Springer Science & Business Media. 445 pp.
- Hreško, J., Bugár, G., and Petrovič, F. (2009). Changes of vegetation and soil cover in alpine zone due to anthropogenic and geomorphological processes. *Landform Analysis*, 10, 39-43.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI (2017). "Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos". Aguascalientes, Ags. Méx: INEGI. 1066 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI (7 de agosto de 2019). *Continuo de Elevaciones Mexicano*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Jandl, N., Jandl, R., and Schindlbacher, A. (2018). Future management options for cembran pine forests close to the alpine timberline. *Annals of Forest Science*, 75(3), 81. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0760-4>
- Jáuregui, O., E. (1975). Los sistemas de tiempo en el Golfo de México y su vecindad. *Investigaciones geográficas*, (6), 7-36.
- Kaczka, R. J., Lempa, M., Czajka, B., Janecka, K., Rączkowska, Z., Hreško, J., and Bugar, G. (2015). The recent timberline changes in the Tatra Mountains: A case study of the Mengusovská Valley (Slovakia) and the Rybi Potok Valley (Poland). *Geographia Polonica*, 88(2), 71-83. <http://dx.doi.org/10.7163/GPol.0016>
- Kogan, F., Gitelson, A., Zakarin, E., Spivak, L., and Lebed, L. (2003). AVHRR-based spectral vegetation index for quantitative assessment of vegetation state and productivity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(8), 899-906.
- Kullman, L. (1987). A decade of tree-line monitoring in the southern Swedish Scandes. *UNGI Rep.* (65), 91-202.
- Lauer, W. and Klaus, D. (1975). Geoecological investigations on the timberline of Pico de Orizaba, Mexico. *Arct. Alp. Res.* 7 (4), 315-330.
- Li, B. S. (1993). The alpine timberline of Tibet. In: (Alden, J., Mastrantonio, J. L. and Odum, S., Eds.) *Forest development in cold climates*: (pp. 511-527), New York, USA: Spinger. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1600-6_34
- Li, Y., Chen, J., Ma, Q., Zhang, H. K., and Liu, J. (2018). Evaluation of Sentinel-2A surface reflectance de-

- rived using Sen2Cor in North America. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(6), 1997-2021. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2835823>
- Macías, J., Arce, J., García-Tenorio, F., Layer, P., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., López-Pizaña, F., and Avellán, D. (2012). Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico. In Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., and Molina-Garza, R.S., (Eds.) *The Southern Cordillera and Beyond: Field Guide*. 25. (pp. 163-193). Boulder, Co., USA: The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2012.0025\(08\)](https://doi.org/10.1130/2012.0025(08))
- Malini, A. S., and Somashekar, R. K. (2013). Multispectral Monitoring of Vegetation Cover of Bangalore Metropolitan Area. *Global Journal of Bio-Science and Biotechnology*, 2(1), 27-32.
- Malyshev, L. (1993). Levels of upper forest boundary in northern Asia. *Vegetation* (109), 175-186. <https://doi.org/10.1007/BF00044749>
- Martin-Del Pozzo, A. L. (2012). Precursors to eruptions of Popocatepetl volcano, Mexico. *Geofísica internacional*, 51(1), 87-107.
- Montero-García, I. A. (2004). *Atlas arqueológico de la alta Montaña mexicana*. México, D.F. Méx: SEMARNAT. 180 pp.
- Mooser, F. (1958). Active volcanoes of Mexico. In Meyer, A. H. and MacBirney, A. R. (Eds). *Catalogue of active volcanoes of the world including Solfatar Fields. Part VI. Mexico and Central America*. Naples, Italy: International Volcanological Association. 36 pp.
- Nelson, M. D., McRoberts, R. E., Holden, G. R., and Bauer, M. E. (2009). Effects of satellite image spatial aggregation and resolution on estimates of forest land area. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8), 1913-1940. <https://doi.org/10.1080/01431160802545631>
- Norini, G., Capra, L., Groppelli, G., Agliardi, F., Pola, A., and Cortes, A. (2010). Structural architecture of the Colima volcanic complex. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B12). <https://doi.org/10.1029/2010JB007649>
- Odland, A. (2015). Effect of latitude and mountain height on the timberline (*Betula pubescens ssp. czerpanovii*) elevation along the central Scandinavian mountain range. *Fennia-International Journal of Geography*, 193(2), 260-270. <https://fennia.journal.fi/article/view/48291>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, ONUAA. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010, Informe Nacional, México*. Roma, Italia: FAO. 98 pp.
- Peres-Neto, P. R., Jackson, D. A., and Somers, K. M. (2005). How many principal components? Stopping rules for determining the number of non-trivial axes revisited. *Computational Statistics & Data Analysis*, 49(4), 974-997. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.06.015>
- Reddy, A. S., and Reddy, M. J. (2013). NDVI based assessment of land use land cover dynamics in a rainfed watershed using remote sensing and GIS. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(12), 87-93.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., Méx: Limusa. 504 pp.
- Sader, S. A., and Winne, J. C. (1992). RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics. *International journal of remote sensing*, 13(16), 3055-3067. <https://doi.org/10.1080/01431169208904102>
- Salomons, J. B. (1986). Palaeoecology of volcanic soils in the Columbian central cordillera (Parque Nacional de los Nevados). *Dissertationes Botanicae* (95), 1-212.
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques*, 14(1), 107-120. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222>
- Santaella, W. (2013). Modelos espaciales de la dinámica de la vegetación en escenarios de cambio climático en el «Timberline» selva nublada-paramo de la vertiente norte de la Sierra Nevada de Mérida (Venezuela); escenario B1 y situación constante. *Revista de Teledetección*, 39, 63-82.
- Schwörer, C., Henne, P. D., and Tinner, W. (2014). A model-data comparison of Holocene timberline changes in the Swiss Alps reveals past and future drivers of mountain forest dynamics. *Global change biology*, 20(5), 1512-1526. <https://doi.org/10.1111/gcb.12456>
- Singh, C.P., Panigrahy, S and Thaplyal, A. (2012). Monitoring alpine treeline shift in parts of the Indian Himalayans using remote sensing. *Current Sci-*

- ence 102(4), 559-562. <https://www.jstor.org/stable/24084105>
- Sitko, I., and Troll, M. (2008). Timberline changes in relation to summer farming in the Western Chornohora (Ukrainian Carpathians). *Mountain Research and Development*, 28(3), 263-272. <https://doi.org/10.1659/mrd.0963>
- Soto-Molina, V., Yoshikawa, K., and Schörghofer, N. (2020). Climatic variation in the high-mountain of central Mexico: temperature and precipitation indices at the Nevado de Toluca volcano. *Atmósfera*. <https://doi.org/10.20937/ATM.52768>
- Soto-Molina, V. H. y Delgado-Granados, H. (2020). Dos años de observaciones de temperatura superficial del aire y del suelo en la vertiente norte del volcán Pico de Orizaba, México. *Acta Universitaria*, 30(1), 1-16. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2427>
- Soto, V. y Delgado, H. (2020). Estimación de la temperatura del aire en la alta montaña mexicana mediante un modelo de elevación del terreno: caso del volcán Nevado de Toluca (México). *Ería. Revista Cuatrimestral de Geografía* 2020(2), 167-182. <https://doi.org/10.17811/er.2.2020.167-182>
- Steinmann, V. W., Amezcua, L. A., Amezcua, Y. R., Méndez, S. M. V., Cárdenas, R. A. H., y Yanes, Y. A. M. (2019). *La vegetación alpina mexicana: islas frías sobre las nubes*. Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad. México, D.F., Méx: CONABIO. 20 pp.
- Takahashi, K., Hirose, T., and Morishima, R. (2012). How the timberline formed: altitudinal changes in stand structure and dynamics around the timberline in central Japan. *Annals of botany*, 109(6), 1165-1174. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs043>
- Turunen, M., and Latola, K. (2005). UV-B radiation and acclimation in timberline plants. *Environmental Pollution*, 137(3), 390-403. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.030>
- United States Geological Survey, USGS (5 de agosto de 2019). *EarthExplorer*. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vincze, I., Orbán, I., Marinova, E., Jakab, G., Birks, H. H., Finsinger, W., and Magyari, E. K. (2014). Drivers of Holocene treeline and timberline changes in the Retezat Mountains (South Carpathians, Romania). *GEOREVIEW: Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava. Geography Series*, 24(2), 184-185.
- Wang, T., Zhang, Q. B., and Ma, K. (2006). Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Global Ecology and Biogeography*, 15(4), 406-415. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00233.x>
- Ward, J. V. (1994). Ecology of alpine streams. *Freshwater biology*, 32(2), 277-294. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1994.tb01126.x>
- Wieser, G. and Tausz, M. (Eds). (2007). *Trees at their upper limit. Treeline limitation at the alpine timberline*. Dordrecht, the Netherlands: Springer. 232 pp.
- Zaitunah, A., Ahmad, A. G., and Safitri, R. A. (2018). Normalized difference vegetation index (ndvi) analysis for land cover types using landsat 8 oli in besitang watershed, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 126 (1), 012112. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/126/1/012112>