

Determinación del uso potencial del suelo a partir de la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales de un área de protección ambiental ubicada en la Región Centro-Sur de México

Potential land use determination from geospatial modeling of agroecological and forest variables of an environmental protection area located in the Central South Region of Mexico

Daniel Villegas Martínez^{1*}

^{1*}Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco. Km. 22, Carretera Tenango - La Marquesa Santiago Tilapa, Santiago Tianguistenco, 52650, México. Teléfono: +52 7131350900. Ext: 125, inv_dtianguistenco@test.edu.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

La degradación de los suelos en áreas naturales protegidas (ANP) de México se deriva del comportamiento irracional de la sociedad en estos espacios geográficos, aunado al carente diseño, instrumentación y regulación de políticas de manejo por parte de las autoridades facultadas. Cimentada en esta realidad, la presente investigación tuvo por objetivo determinar el uso potencial del suelo mediante la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales del territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México. Para su desarrollo se diseñó la siguiente metodología: a) selección de variables agroecológicas y forestales de acuerdo con las características geográficas del territorio; b) ponderación de variables mediante el método *Scoring*; c) modelación geoespacial de variables mediante métodos superposición en ambiente de sistemas de información geográfica (SIG) y d) validación de la información. Los resultados exponen que, de acuerdo con la modelación de las variables territoriales, el espacio administrativo del parque es adecuado para desarrollar actividades vinculadas con el desarrollo forestal en más del 85% de su superficie terrestre.

Palabras clave: Análisis espacial; áreas naturales protegidas; sistemas de información geográfica; superposición ponderada.

Abstract

The degradation of land in protected natural areas in Mexico is caused to a great extent by the irrational behavior of society on these geographic spaces, along with the lack of design, instrumentation, and regulation of management policies. Based on this reality, the objective of this research was to determine the potential land use through the geospatial modeling of agroecological and forest variables of the administrative territory of the Otomí-Mexica Park of the State of Mexico. To this end, the following methodology was designed: a) selection of agroecological and forest variables according to the geographical characteristics of the territory; b) weighting of variables using the *Scoring* method; c) geospatial modeling of variables using superposition methods in geographic information systems (GIS) environments; and d) information validation. The results show that, according to the modeling of the territorial variables, the administrative space of the park is adequate to develop activities related to forest development in more than 85% of its land area.

Keywords: Spatial analysis; protected natural areas; geographic information systems; weighted overlay.

Recibido: 02 de noviembre de 2020

Aceptado: 25 de marzo de 2021

Publicado: 23 de junio de 2021

Como citar: Villegas Martínez, D. (2021). Determinación del uso potencial del suelo a partir de la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales de un área de protección ambiental ubicada en la Región Centro-sur de México. *Acta Universitaria* 31, e3049. doi. <http://doi.org/10.15174/au.2021.3049>

Introducción

La crisis civilizatoria, detonada por la irracionalidad humana sobre el manejo ambiental y el acelerado crecimiento de los grandes modelos de desarrollo económico que actualmente controlan la explotación irracional de los componentes naturales, ha traído como consecuencias directas e indirectas el aumento de la degradación ambiental, la cual está asociada a procesos de cambios de uso de suelo y vegetación, contaminación de cuerpos de agua y ríos, emisión de gases de efecto invernadero y pérdida de biodiversidad, solo por mencionar algunos de los muchos efectos negativos que ponen en riesgo la vida humana y no humana (Leff, 2007).

Durante la década de 1970, la Dirección General de Conservación del Suelo y del Agua estimó que más del 80% de los suelos en México se encontraban bajo diferentes grados de degradación, situación que impacta de manera directa la capacidad del suelo para proveer bienes y servicios. Ante este panorama, la entonces Secretaría de la Presidencia de México propuso al Colegio de Postgraduados de la Universidad Autónoma de Chapingo elaborar un manual que pudiera utilizarse como el eje rector de las dependencias gubernamentales responsables de llevar a cabo trabajos de conservación de suelo y agua. Dicho manual tuvo como finalidad unificar criterios y elegir los mejores métodos y estrategias de control ante los usos inadecuados del suelo (Colegio de Postgraduados, 1991).

A principios del siglo XXI, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) desarrolló un método holístico para determinar el uso potencial del suelo. Este método determina la aptitud de la tierra para dar soporte a su uso adecuado. A diferencia del método de clasificación de tierras según su capacidad de uso, este método incorporó un número mayor de factores en formato digital, estableciendo que el uso potencial del suelo fuera determinado a partir de información de clima, edafología, usos del suelo y vegetación, modelos digitales de elevación, cuencas hidrográficas, áreas naturales protegidas e imágenes de satélite (INEGI, 2019).

La importancia de estos métodos es definir el uso más adecuado e intensivo del suelo para garantizar la sostenibilidad de los bienes y servicios ambientales; no obstante, su análisis y desarrollo en México aún es limitado e incluso excluido de los programas nacionales de desarrollo y del Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024 (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2020). En este último se abordan temas de protección y restauración del suelo como parte de una estrategia nacional en beneficio de los sistemas de producción sustentables (por ejemplo, ecosistemas y su biodiversidad).

Sin embargo, los criterios establecidos para realizar la protección y restauración de los suelos no consideran como la base de su análisis el cálculo y la modelación espacial del uso potencial del suelo, aun cuando este análisis permite delimitar de manera espacial unidades de suelo con limitaciones de producción y vocaciones similares, de tal manera que se puede determinar el uso más razonable de acuerdo con las características biofísicas y agroecológicas de los territorios en estudio.

De acuerdo con la importancia de este método, la presente investigación tuvo por objetivo determinar y analizar el uso potencial del suelo dentro del territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, el cual fue calculado mediante la selección y modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales que son características de la Región Centro-Sur de México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área natural protegida (ANP) Parque Ecológico Turístico y Recreativo Zempoala-La Bufa, denominado Parque Otomí-Mexica del Estado de México, fue decretado con la categoría de Parque Estatal el día 8 de enero de 1980. Su territorio administrativo se encuentra ubicado en la Región Centrosur de México, entre las coordenadas geográficas extremas $18^{\circ} 59' 59.57''$ - $19^{\circ} 45' 19.34''$ N y $99^{\circ} 20' 21.75''$ - $99^{\circ} 32' 01.41''$ O (figura 1). Tiene una superficie terrestre aproximada de 105 875 ha, distribuidas en 16 municipios del Estado de México (Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México, 1980; Villegas & Gómez, 2020).

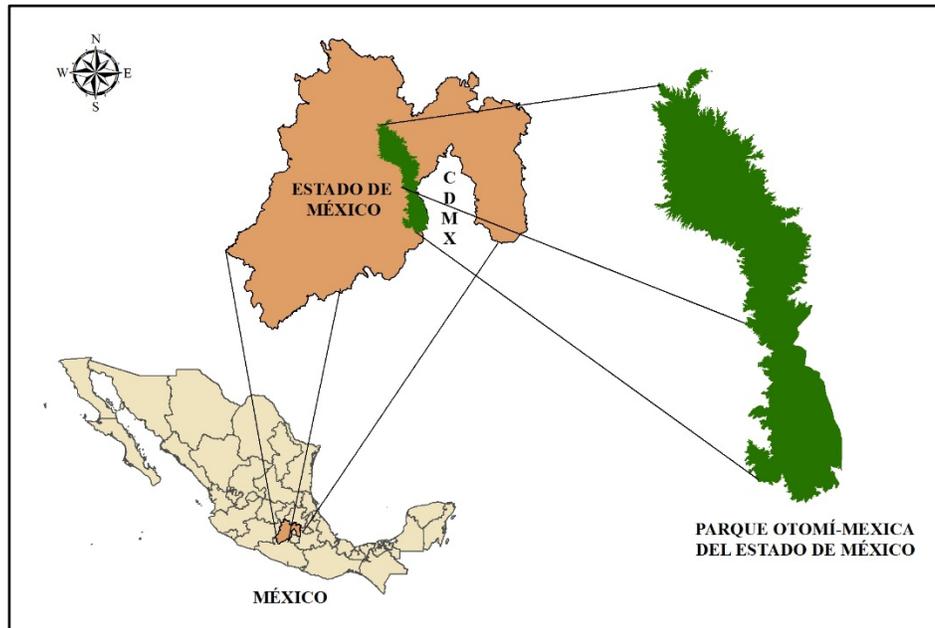


Figura 1. Ubicación geográfica del Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

Materiales

Los materiales utilizados en el desarrollo de esta investigación se presentan en la tabla 1. Los metadatos de los insumos geoespaciales utilizados se estandarizaron, quedando los parámetros cartográficos dentro de la Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), zona 14 norte, datum WGS1984.

Tabla 1. Insumos geoespaciales.

Tema	Escala	Resolución espacial	Formato digital	Año	Fuente
Temperatura media anual	1:250 000	No aplica	Shapefile	2018	PEOT ¹
Precipitación media anual	1:250 000	No aplica	Shapefile	2018	PEOT
Edafología	1:250 000	No aplica	Shapefile	2018	PEOT
Serie VI Uso de suelo y vegetación	1:250 000	No aplica	Shapefile	2018	INEGI ²
Modelo de Elevación Digital	No aplica	10 m	TIFF	2013	INEGI
Pendientes del territorio	No aplica	10 m	TIFF	2013	INEGI
Imagen de satélite SENTINEL 2	No aplica	10 m	JPEG	2019	<i>Copernicus Open Access Hub</i>

Fuente: Elaboración propia.

¹ Programa Estatal de Ordenamiento Territorial del Estado de México 2018.

² Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Selección de variables agroecológicas y forestales para determinar el uso potencial del suelo

La selección de variables agroecológicas se realizó conforme a los indicadores establecidos en el Manual de Requerimientos Agroecológicos de Cultivos, realizado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y considerando dos conceptos: localidad y rendimiento. El primero permitió realizar la selección de variables conforme a las características locales del territorio, y el segundo permitió realizar la selección de variables de acuerdo con las necesidades de fertilidad de los cultivos locales como maíz, papa y avena forrajera. Estos son los principales cultivos de temporal que se producen dentro del límite administrativo del ANP (tabla 2).

Tabla 2. Variables agroecológicas para determinar el uso potencial del suelo con vocación agrícola.

Categorías	VARIABLES	Unidad de medida
Climática	Temperatura	10 °C–28 °C
	Precipitación	700 mm–1100 mm
Edafológica	Suelos (tipo)	Feozem Luvisol Vertisol
	Textura (suelo)	Arcillosa Limos
	Profundidad (suelo)	50 cm–100 cm
	Usos de suelo y vegetación	Agricultura Pastizales
Fisiográfica	Altitud	0 msnm–2500 msnm
	Pendientes	<10 °

Fuente: Elaboración propia con base en el manual de Requerimientos Agroecológicos de Cultivos (INIFAP, 2013).

La selección de variables forestales se realizó de acuerdo con las características biofísicas del territorio en estudio, algunas de ellas son: relieve, clima, suelo y ecosistemas que permiten el desarrollo de bosques templados de pino y oyamel, bosques latifoliados de encinos y bosques mesófilos de montaña en la Región Centro-Sur de México. Estos datos fueron obtenidos de las fichas de identificación de bosques de México, elaboradas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Las variables seleccionadas se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Variables para determinar el uso potencial del suelo con vocación forestal.

Categorías	VARIABLES	Unidad de medida
Climática	Temperatura	10 °C–22 °C
	Precipitación	600 mm–3000 mm
Edafológica	Suelos	Andosol
		Cambisol
		Leptosol
	Textura (suelos)	Luvisol
		Arcillosos
		Arenosos
Ecosistémica	Profundidad (suelos)	Limos
		0 cm–100 cm
		Usos de suelo y vegetación
Fisiográfica	Altitud	800 msnm-5500 msnm
	Pendientes	0° - 43°

Fuente: Elaboración propia con bases fichas de identificación de bosques templados de pino y oyamel, bosques latifoliados de encinos y bosques mesófilos de montaña de la Región Centrosur de México (SEMARNAT, 2020).

Modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales para determinar el uso potencial del suelo

Esta etapa de la investigación se realizó con la aplicación del método de superposición, sistematizado dentro de la interfaz del *software ArcGis 10.5™* en su herramienta *Weighted Overlay*. Las fases de aplicación fueron:

- a) Representación cartográfica en archivos *shapefiles* de las variables representadas en las tablas 2 y 3 (figura 2).

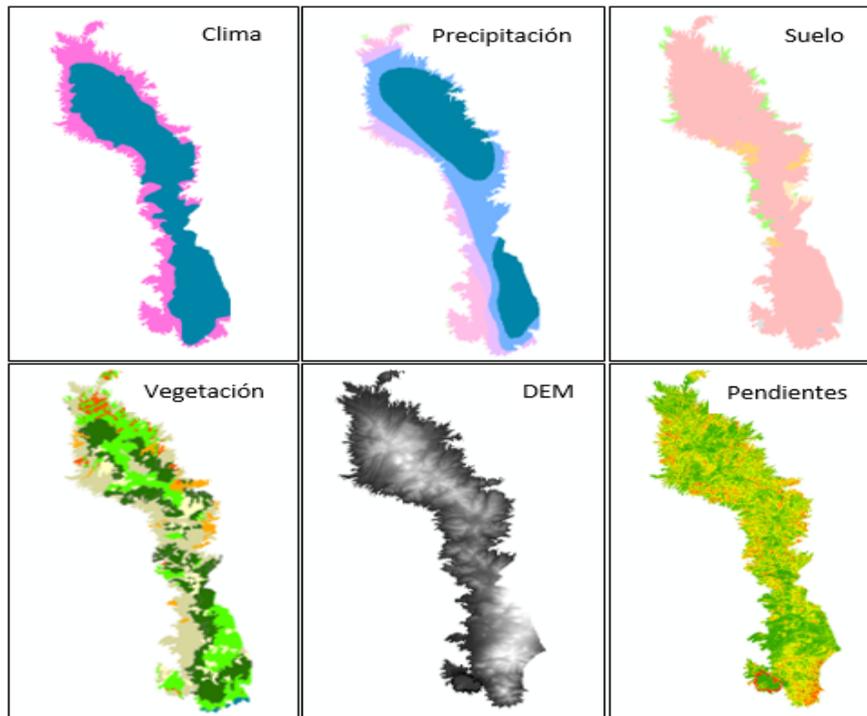


Figura 2. Representación cartográfica de las variables agroecológicas y forestales utilizadas para determinar el uso potencial del suelo.
Fuente: Elaboración propia.

- b) Aplicación del método *Scoring* para determinar los niveles de ponderación sobre las variables agroecológicas y forestales, seleccionadas y representadas en formato *shapefile*. Mediante su aplicación se determinaron dos niveles de ponderación (2 = apto y 1 = no apto), estos valores se asignaron a las variables representadas en las tablas 4, 5, 6 y 7. Es importante resaltar que los valores representados en estas tablas son para determinar el uso potencial del suelo con vocación agrícola; no obstante, también se realizó su aplicación para las variables forestales.

Tabla 4. Variables climáticas.

Temperatura		Precipitación	
Clima	Ponderación	mm	Ponderación
Templado (Cwbg)	2	850-950	2
Semifrio (C(E)wg)	1	950-1050	2
		1050-1150	2
		1150-1250	1
		>1250	1

Fuente: Elaboración propia con base en el manual de Requerimientos Agroecológicos de Cultivos (INIFAP, 2013).

Tabla 5. Variables edafológicas.

Suelo	Ponderación	Textura	Ponderación	Profundidad	Ponderación
Andosol	1	Arenas	1	< 50 cm	1
Cambisol	1	Arcillosa	2	50 cm - 100 cm	2
Feozem	2	Limos	2	< 50 cm	1
Leptosol	1	Arenas	1	25 cm - 75 cm	2
Luvisol	2	Limos	2	< 50 cm	1
Vertisol	2	Arcillosa	2	50 cm - 100 cm	2

Fuente: Elaboración propia con base en el manual de Requerimientos Agroecológicos de Cultivos (INIFAP, 2013).

Tabla 6. Variables de uso de suelo y vegetación.

Uso de suelo y vegetación	Ponderación
Agricultura	2
Asentamiento humano	1
Bosque de encino	1
Bosque de encino-pino	1
Bosque de oyamel	1
Bosque de pino	1
Bosque de pino-encino	1
Bosque mesófilo de montaña	1
Cuerpo de agua	1
Pastizal inducido	2

Fuente: Serie VI. Uso de suelo y vegetación (INEGI, 2016).

Tabla 7. Variables fisiográficas.

Altitud		Pendiente	
Intervalo	Ponderación	Intervalo	Ponderación
0-2700	2	<10	2
> 2700	1	>11	1

Fuente: Elaboración propia con base en el manual de Requerimientos Agroecológicos de Cultivos (INIFAP, 2013).

- c) Asignación de niveles de ponderación a los datos tabulares contenidos dentro de los archivos *shapefile* que corresponden a las variables representadas en las tablas 2 y 3.
- d) Aplicación del método de superposición (*Weighted Overlay*) a las variables agroecológicas y forestales, seleccionadas y ponderadas. El producto obtenido de la modelación geoespacial (archivo *shapefile*) se sobrepuso con la imagen de satélite SENTINEL 2 del año 2020, que cubre el área de estudio, esto como parte de un proceso de verificación en donde el objetivo principal fue confrontar la información obtenida con la estructura real del territorio.

Resultados

Derivado de la modelación geoespacial sobre las variables agroecológicas y forestales seleccionadas, se obtuvo la figura 1, la cual representa el uso potencial del suelo dentro del territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

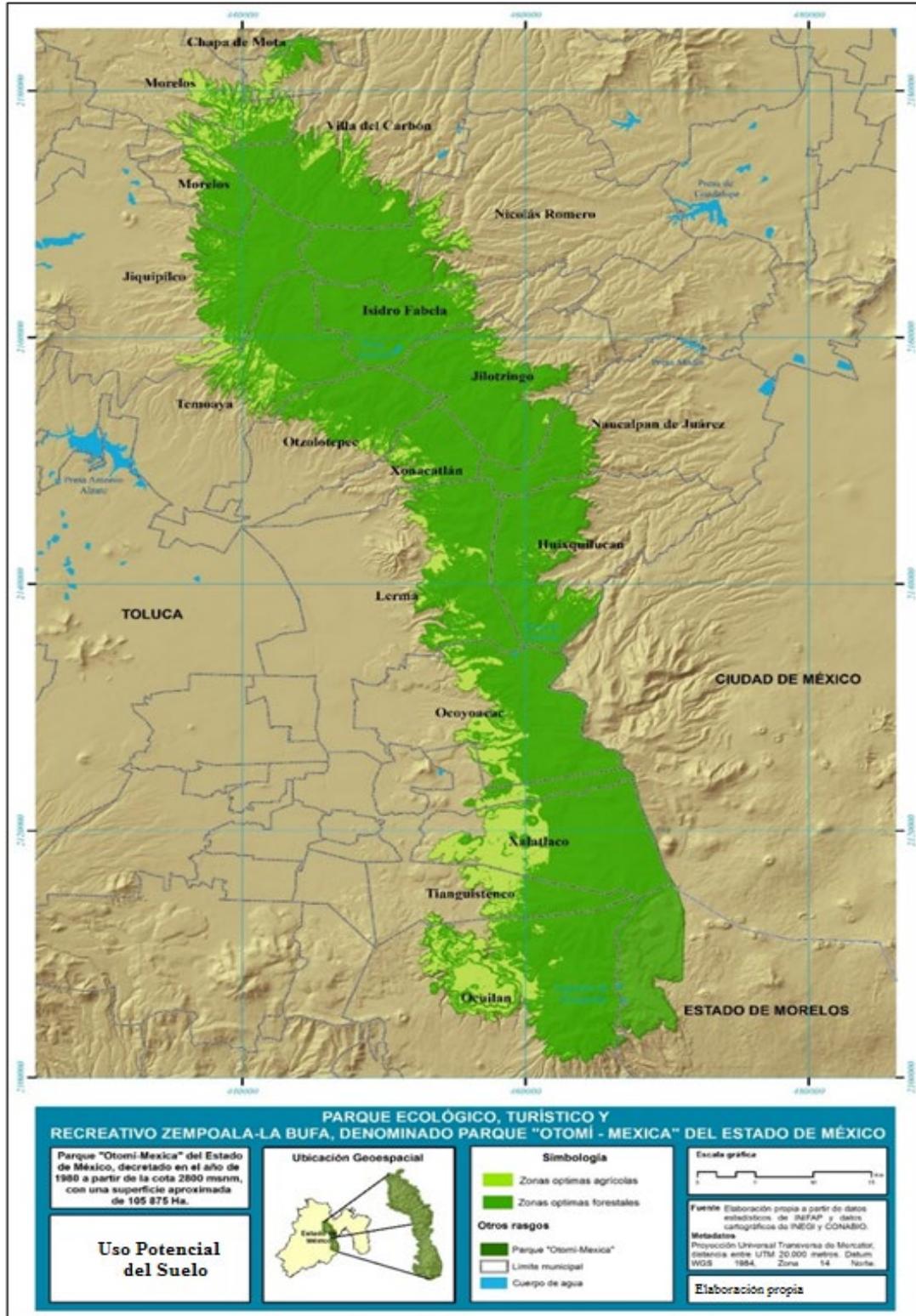


Figura 3. Uso potencial del suelo dentro del área administrativa del Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

Fuente: Elaboración propia.

Las áreas del territorio representadas en color verde claro corresponden a zonas óptimas agrícolas, su estructura corresponde a la capacidad de uso agrícola para desarrollar cultivos mediante el proceso de labranza tradicional o convencional (Colegio de Posgraduados, 1991). De acuerdo, con los datos estadísticos derivados de la modelación geoespacial, la superficie terrestre que debería ocupar el suelo con potencial agrícola dentro del territorio administrativo del parque es de aproximadamente 14 698.68 ha, que representa el 13% de su territorio.

Otros resultados obtenidos determinan que las áreas con potencial agrícola corresponden a terrenos con pendientes menores a 8°, donde la estructura topográfica del territorio es relativamente uniforme (semiplana), y las características geomorfológicas corresponden a laderas convexas, formadas por derrames y flujos piroclásticos. Las características de la red hidrológica en estas áreas presentan una aparente homogeneidad, la red está constituida principalmente por escurrimientos temporales (ríos intermitentes). Los suelos son de tipo Andosol y su principal peculiaridad es su color oscuro (negro), el cual se le atribuye fundamentalmente a la acumulación de cenizas volcánicas y materia orgánica (INEGI, 2001; Juan *et al.*, 2017).

En cuanto a los aspectos socioculturales que se desarrollan en estas porciones del territorio, se puede resaltar que las áreas con potencial agrícola se encuentran situadas cerca de localidades (urbanas y rurales) y vías de comunicación primarias (recubiertas con algún tipo de material, cemento o asfalto) y secundarias (sin recubrimiento alguno), aspectos que le confiere mayor disponibilidad de recursos técnicos para obtener mejores rendimientos agrícolas.

Por otra parte, las áreas del territorio representadas en color verde oscuro corresponden a zonas óptimas forestales, su estructura se determinó a partir de la capacidad de uso forestal, la condición de la vegetación y la aptitud para la extracción de los productos forestales (INEGI, 2019). De acuerdo con los resultados obtenidos, las áreas con potencial forestal deberían comprender una superficie aproximada de 91 167.32 ha, cifra que representa el 87% del territorio administrativo del parque.

Las características fisiográficas de las áreas determinadas con potencial forestal corresponden principalmente a zonas donde el promedio altitudinal oscila entre 2900 msnm y 3750 msnm, presentan un relieve irregular a lo largo de sus 85 kilómetros de longitud, condición asociada con las características del Eje Neovolcánico y de manera específica con la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac. La litología y estructura del territorio están constituidas principalmente por rocas ígneas extrusivas como andesitas, basaltos, tobas básicas y brechas volcánicas básicas (Juan *et al.*, 2017; Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México, 2009).

El clima es semifrío subhúmedo con lluvias en verano C (E) (w2) (w), y la temperatura media anual oscila entre los 8 °C y 10 °C; los niveles de precipitación fluctúan entre 800 mm y 1250 mm. Las condiciones edafológicas corresponden a suelos de tipo Andosol constituidos principalmente de cenizas, vidrios volcánicos y materiales piroclásticos que le confieren un color oscuro; estos suelos son característicos de relieves montañosos (Conagua, 2015; INEGI, 2001; Juan *et al.*, 2017; Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México, 2009; Villegas & Gómez, 2020).

La asociación de los elementos fisiográficos del territorio del parque ha permitido el desarrollo de ambientes naturales como bosques templados de pino, oyamel y mixtos (pino-oyamel y oyamel-pino); bosques latifoliados compuestos principalmente de especies de encinos y bosques mesófilos de montaña; y ecosistemas característicos de la región fisiográfica Eje Neovolcánico, conocida como Sierra Volcánica Transversal de México (Conanp, 2020). En menor proporción, existen ambientes constituidos por pastizales inducidos y matorrales asociados, que son producto del impacto ambiental ocasionado por el desarrollo de actividades antrópicas de las localidades internas y aledañas al territorio administrativo del parque (Villegas & Gómez, 2020).

Dentro de las áreas consideradas con potencial forestal no existen asentamientos humanos; sin embargo, el desarrollo de actividades forestales y turísticas han permitido la apertura de vías de comunicación (caminos de terracería y veredas) de manera desordenada, esto a su vez fomenta el desarrollo de procesos locales de transformación que detonan el cambio de uso de suelo y vegetación, el cual se traduce en una severa degradación ambiental del territorio (Villegas *et al.*, 2019; Villegas & Gómez, 2020).

Los cambios de uso del suelo y vegetación son ocasionados por la tala forestal clandestina; el crecimiento de las áreas agrícolas y turísticas; la construcción y aumento de vías de comunicación (carreteras y tren interurbano); el establecimiento y expansión de asentamiento humanos; los incendios forestales y los procesos de fragmentación ocasionados por el pastoreo de ganado local; la conducción de redes eléctricas e hídricas; y, en menor proporción, por el establecimiento y desarrollo del aprovechamiento forestal maderable (Villegas *et al.*, 2020).

Discusión

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, conocida por sus siglas en inglés como FAO (*Food and Agricultural Organization*) considera que la modelación empleada para determinar el uso potencial del suelo se realiza de manera técnica, logrando con ello establecer los criterios de uso y aprovechamiento que la población debe realizar sobre sus territorios de injerencia; no obstante, no considera por sí misma qué cambios deben adoptar las sociedades para adaptarse al uso potencial del suelo (FAO, 2003).

De acuerdo con el INEGI, la importancia del uso potencial del suelo se basa en determinar técnicamente los usos agrícolas, pecuarios y forestales de un territorio de manera factible y demostrar la posibilidad de ser instrumentados en la realidad mediante una serie de requerimientos técnicos y biológicos para cada uso potencial, evitando con esta práctica la degradación socioambiental de los territorios y sus componentes (INEGI, 2019).

Para el caso del territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, el cálculo del uso potencial del suelo puede proporcionar las bases técnicas para el diseño de estrategias encaminadas hacia el aprovechamiento sustentable de los territorios bajo protección ambiental en México, y con ello una serie de criterios para el diseño geoespacial de políticas de manejo³, dentro de las cuales se establecen las actividades permitidas, supervisadas y restringidas que la población local y externa al territorio pueden desarrollar (Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna [Cepanaf], 2016).

³ De acuerdo con el Programa de Manejo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, las políticas de manejo que administran su territorio son: aprovechamiento, conservación, protección y restauración (Cepanaf, 2016).

Los datos cuantitativos y cualitativos que se obtuvieron durante la modelación geoespacial del uso potencial del suelo pueden ayudar a cimentar el diseño de estrategias sobre el aprovechamiento de los componentes territoriales y mejorar la toma de decisiones sobre la administración pública de los territorios bajo protección ambiental. Además, se pueden realizar programas de monitoreo y evaluación geoespacial y estadístico sobre la efectividad del uso potencial del suelo, mediante el cual se puede constatar que la integridad ecológica del área protegida se mantiene mediante la serie de estrategias de manejo que se implementan.

Por ejemplo, cuando se determina el uso potencial agrícola se busca la compatibilidad entre las propiedades físico-químicas del suelo y las características fisiográficas del territorio, la interrelación de estos componentes permite modelar la ubicación espacial de las áreas del territorio que ofrecen mejores rendimientos de producción agrícola por periodos prolongados y generando el mínimo deterioro ambiental, esto permite mejorar el nivel de vida de los agricultores y sus familias, manteniendo la integridad de los componentes territoriales (Flores *et al.*, 1999; Santiago, 2005).

Determinar el uso potencial del suelo dentro de los territorios bajo protección ambiental en México proporciona una serie de variables (ambientales, socioculturales y jurídicas) acerca del territorio, lo que permite la modelación geoespacial de políticas de manejo, principalmente de aquellas orientadas hacia el aprovechamiento, conservación y protección. Esto es en función de una serie de capacidades productivas, limitantes ecológicas, objetivos y criterios de protección sobre el manejo y administración territorial, como se establece en el Manual de Términos de Referencia para la Elaboración de Programas de Manejo de las Áreas Naturales Protegidas, competencia de la Federación y emitido por la Conanp (2018).

Un ejemplo tangible sobre la relación del uso potencial del suelo y las políticas de manejo se puede observar en la figura 4. Las áreas representadas en color café son aquellas que, de acuerdo con la modelación geoespacial, resultan ser viables para desarrollar actividades agrícolas de temporal, de acuerdo con los requerimientos del Manual de Términos de Referencia. Esta potencialidad del territorio se puede traducir a una política de aprovechamiento, en ella se establecen las áreas que pueden ser viables para el aprovechamiento y desarrollo de actividades económicas (Conanp, 2018; Villegas *et al.*, 2019).

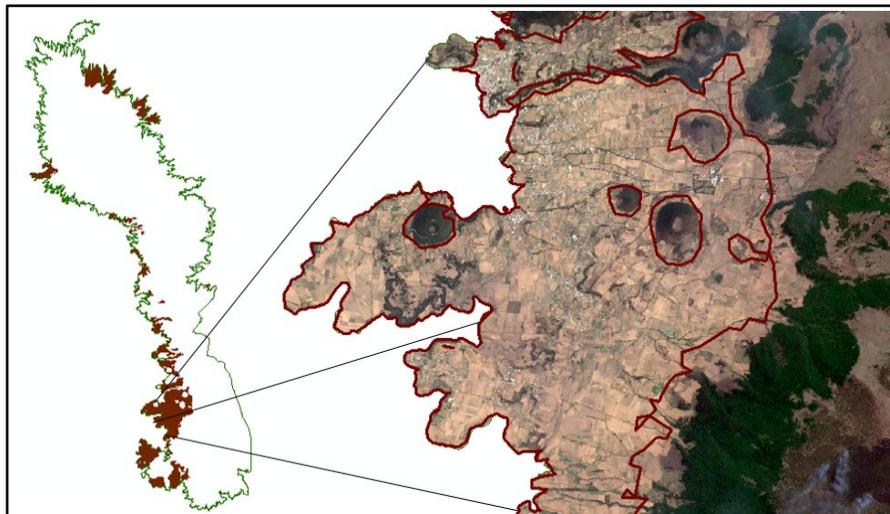


Figura 4. Delimitación geográfica de las áreas con potencial agrícola en el territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, al sobreponer el límite cartográfico del uso potencial agrícola sobre una imagen de satélite, se puede observar que el desarrollo de actividades agrícolas ha invadido áreas con diferente potencialidad de uso, esto se traduce en degradación ambiental del territorio, aun cuando este ha sido decretado bajo protección ambiental; de allí la importancia de realizar modelaciones del territorio con base al uso potencial del suelo, pues a partir de los resultados se pueden verificar inconsistencias derivadas de los usos inadecuados del territorio.

Espejel-García *et al.* (2015) determinan el uso potencial del suelo en el territorio de una cuenca hidrológica del centro-norte del estado de Guerrero, mediante modelación geoespacial y análisis multicriterio de seis variables fisiográficas del territorio, obteniendo como resultado las zonas viables para el desarrollo agrícola de temporal, irrigación y cultivos industrializados. Sin embargo, su análisis solo se limita a ubicar de manera espacial las áreas con potencial agrícola, análisis que limita obtener una perspectiva integral sobre la estructura viable y real del territorio en estudio.

No obstante, el presente estudio, además de modelar y analizar el uso potencial de suelo, analiza las relaciones existentes con datos geoespaciales obtenidos del territorio en otros estudios con diferente temporalidad, pero orientados hacia la conservación del territorio. Durante el Programa de Conservación y Manejo del año 2009 y en el Programa de Manejo del año 2016, ambos realizados para el territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, se estableció una zonificación ambiental⁴ (Cepanaf, 2009, 2016). A partir de dicha zonificación, analizada desde una perspectiva crítica y confrontada con la modelación obtenida en el presente estudio, se determina que las políticas de manejo, aprovechamiento, conservación y protección (zonificación ambiental) no consideran dentro de su esquema de espacialización territorial los criterios establecidos en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas y el Código para la biodiversidad del Estado de México Libro segundo⁵ para determinar su zonificación (Conanp, 2018; Diario oficial de la Federación [DOF], 1988, 2000; Gobierno del Estado de México [GEM], 2005; Villegas *et al.*, 2019).

Estos criterios establecen que el uso potencial del suelo es una variable indispensable para la modelación de políticas de manejo dentro de los territorios bajo protección ambiental (DOF, 2000), ya que tienen la finalidad de mantener las características biológicas y la vocación natural del uso del suelo; sin embargo, al no contemplar la variable de uso potencial del suelo en el diseño y modelación de políticas de manejo, es difícil establecer criterios cuantitativos para determinar si las políticas cumplen con los criterios establecidos en el decreto de institucionalización del parque y en la normatividad establecida en la Legislación Ambiental Mexicana (DOF, 1988; Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México, 1980).

Un estudio realizado por Villegas *et al.* (2019) dentro del territorio administrativo del parque determina que la tasa de crecimiento para la política de aprovechamiento durante el periodo de análisis 2009-2016 fue del 46.44%. Uno de los principales factores que se asocian a este fenómeno es un crecimiento desordenado de las actividades de aprovechamiento (agricultura, ganadería, turismo y uso habitacional, principalmente). Este crecimiento es consecuencia del carente diseño de modelos integrales

⁴ La zonificación ambiental del Parque Otomí-Mexica del Estado de México corresponde a la representación cartográfica de las políticas de manejo como aprovechamiento, conservación, protección y restauración, establecidas para el territorio administrativo del ANP (Cepanaf, 2009, 2016).

⁵ Dentro de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas, se determinan una serie de criterios ambientales y socioculturales para diseñar y definir la espacialización de políticas de manejo dentro de los territorios de protección ambiental de competencia federal. Sin embargo, el ANP Parque Otomí-Mexica del Estado de México es de carácter estatal, y su administración y planeación se rige conforme a los criterios del Código para la biodiversidad del Estado de México, Libro segundo, Título tercero de la diversidad biológica, los recursos naturales y las áreas naturales protegidas; en el cual se establece una serie de criterios para determinar la espacialización de políticas de manejo dentro de estos espacios administrativos, uno de ellos, y quizás el de mayor importancia, es el uso potencial del suelo (DOF, 1988, 2000; GEM, 2005).

de ordenación territorial e instrumentación de estrategias de desarrollo sustentable. Se cuenta con una zonificación ambiental del territorio; sin embargo, esta se realiza conforme a la distribución real del territorio y no con base al uso potencial del suelo.

Es evidente que la degradación de ecosistemas locales dentro del territorio administrativo del ANP obedece a una problemática compleja derivada de la carente ordenación integral del territorio y su administración. De acuerdo con los datos presentados por Villegas & Gómez (2020), durante el año 1993 la superficie forestal ocupaba el 65% y para el año 2018 el 60% del territorio administrativo del parque. Sin embargo, de acuerdo con los datos obtenidos en esta investigación, la superficie real que deberían ocupar los ecosistemas forestales es del 87% del total del territorio.

Ante esta situación compleja que se experimenta dentro del territorio, es inevitable pensar que las medidas de protección ambiental deben ser diseñadas a partir de modelos complejos de ordenación territorial, los cuales permiten modelar las relaciones existentes entre los componentes del territorio. De acuerdo con Santiago (2005), Espejel-García *et al.* (2015) y Villegas & Gómez (2020), el uso de SIG facilita la modelación de componentes territoriales con mayor rapidez, bajo costo y precisión espacial.

En esta investigación, la aplicación del método de superposición ponderada en ambiente SIG permitió la inclusión y modelación de una serie de variables cualitativas y cuantitativas representativas del espacio geográfico del parque, estas variables están vinculadas estrechamente con el desarrollo agrícola y forestal de la Región Centro de México. La estructura digital de los SIG permite la integración infinita de variables territoriales (ambientales, socioculturales, jurídicas, entre otras) y con ello la generación de modelos complejos del territorio con mayor precisión espacial sobre determinados fenómenos que acontecen de manera positiva o negativa la funcionalidad de los territorios bajo protección ambiental en México (Espejel-García *et al.*, 2015; Morales, 2017).

Conclusiones

Ante la discusión emitida en este trabajo de investigación, es evidente que la propuesta sobre el uso de tecnologías geoespaciales orientadas hacia el análisis espacial del territorio juegan un papel preponderante y transversal en cuanto a la exploración, diseño y propuestas de modelos metodológicos complejos de ordenación territorial, capaces de establecer las potencialidades de los territorios bajo protección ambiental mediante la interrelación de sus componentes y en beneficio de la conservación y mejoramiento ambiental de sus ecosistemas naturales y asentamientos humanos.

Producto de la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales obtenidas a partir de las características geográficas del territorio, se obtiene un escenario gráfico (mapa) viable sobre el aprovechamiento adecuado del territorio administrativo del parque. Como primer acercamiento hacia un escenario territorial viable, la modelación proporciona unidades territoriales capaces de predeterminar cuáles son los ecosistemas agrícolas y forestales que se pueden desarrollar de manera más adecuada dentro del territorio en estudio. Sin embargo, es importante tener presente para investigaciones futuras que las variables obtenidas de las características fisiográficas del territorio permiten obtener unidades del territorio relativamente homogéneas, como las mostradas en este trabajo de investigación. Estas unidades del territorio deberían zonificarse de manera más precisa para obtener subunidades del territorio capaces de proporcionar los elementos técnicos sobre las especies agrícolas y forestales que deben desarrollarse dentro del espacio geográfico del Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

Referencias

- Colegio de Posgraduados. (1991). *Manual de conservación del suelo y del agua* (3ª ed.). Editorial SARH.
- Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (Cepanaf). (2009). *Programa de Conservación y Manejo Parque Estatal Otomí-Mexica*. Gobierno del Estado de México (GEM).
https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2014/48/8/b1b1012efbfcf5d09faeb21adb0adf3c.pdf#:~:text=El%20Programa%20de%20Conservaci%C3%B3n%20y%20Manejo%20del%20Parque%20Estatel%20%22Otom%20parque%20sean%20compatibles%20con%20la
- Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (Cepanaf). (2016). *Programa de Manejo Parque Otomí-Mexica del Estado de México*. Gobierno del Estado de México (GEM).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2020). *Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024*. Conanp. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/programa-nacional-de-areas-naturales-protegidas-2020-2024>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2020). *Áreas Naturales Protegidas*. Conanp. <https://www.gob.mx/conanp>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2018). *Manual de términos de referencia para la elaboración de programas de manejo de las Áreas Naturales Protegidas competencia de la federación*. Conanp. https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/TERMINOS%20DE%20REF-PAGINA.pdf
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2020). *Ecosistemas de México*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2015). *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Conagua. <https://agua.org.mx/biblioteca/determinacion-de-la-disponibilidad-de-agua-en-el-acuifero-zona-metropolitana-de-la-ciudad-de-mexico/>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (28 de enero de 1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_050618.pdf
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (30 de noviembre de 2000). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Áreas Naturales Protegidas*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). https://implanculiacan.mx/transparencia/fraccion_XVI/REGLAMENTO%20DE%20LA%20LEY%20GENERAL%20DEL%20EQUILIBRIO%20ECOL%C3%93GICO%20Y%20PROTECCI%C3%93N%20AL%20AMBIENTE%2021-05-2014.pdf
- Espejel-García, A., Romero-Domínguez, J., Barrera-Rodríguez, A. I., Torres-Espejel, B., & Félix-Crescencio, J. (2015). Determinación del uso potencial agrícola mediante modelación geoespacial y análisis multicriterio para la Cuenca Balsas Mezcala. *Ra Ximhai*, 11(5), 77-95. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46142593005>
- Flores, E., Parra, A., Ferrer, Z., Monsalve, F., Marcano, D., & Becerra, C. (1999). Determinación del uso potencial de la tierra sustentada en Sistemas de Información Geográfica. *Serie Geográfica*, (8), 129-135. <https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/1075/Determinaci%C3%B3n%20del%20Uso%20Potencial%20de%20la%20Tierra%20Sustentada%20en%20Sistemas%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geogr%C3%A1fica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2003). *Evaluación de Tierras con metodologías de FAO. Documento de trabajo*. FAO. http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/proyecto/139jpn/document/2ordenam/talleres/tevt/tfaoevt/doctall/apunteev.pdf
- Gobierno del Estado de México (GEM). (2005). *El código para la biodiversidad del Estado de México*. GEM. <http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/cod/vig/codvig009.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Uso potencial del suelo*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/usopsuelo/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos* (2ª ed.). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). https://www.researchgate.net/profile/Jose_Ruiz_Corral/publication/343047223_REQUERIMIENTOS_AGROECOLOGICOS_DE_CULTIVOS_2da_Edicion/links/5f1310e04585151299a4c447/REQUERIMIENTOS-AGROECOLOGICOS-DE-CULTIVOS-2da-Edicion.pdf
- Juan, J. I., Camacho, J. M., Magallanes, M., Juárez, R., Pozas, J. G., Pérez, J. M., Villegas, D., García, I. E., & Vilchis, A. (2017). *Análisis socioespacial, geográfico, ambiental y ecológico del Parque Otomí-Mexica Estado de México. Serie de Conservación y Manejo de Áreas Naturales Protegidas del Altiplano Mexicano*. Editorial Eumed. https://www.academia.edu/35875561/AN%C3%81LISIS_SOCIOESPACIAL_GEOGR%C3%81FICO_AMBIENTAL_Y_ECOL%C3%93GICO_DEL_PARQUE_OTOM%C3%8D_MEXICA_ESTADO_DE_M%C3%89XICO_Serie_Conservaci%C3%B3n_y_Manejo_de_%C3%81reas_Naturales_Protegidas_del_Altiplano_Mexicano
- Leff, E. (2007). La complejidad ambiental. *Revista de la Universidad Bolivariana*, 5(16), 1-15. https://www.researchgate.net/publication/26485944_La_Complejidad_Ambiental
- Morales, G. (2017). Las ciencias ambientales. Una caracterización desde la epistemología sistémica. *Nova Scientia*, 9(18), 646-697. doi: <https://doi.org/10.21640/ns.v9i18.869>
- Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México. (1980). *Decreto del ejecutivo del estado por el que se crea el parque ecológico, turístico y recreativo Zempoala-La Bufa, que se denominará parque Otomí-Mexica del estado de México*. Gobierno del Estado de México (GEM). https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2016/48/4/6b7f0149607e40476a8bba594c5cdd3b.pdf
- Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México. (2009). *Programa de conservación y manejo del parque ecológico, turístico y recreativo Zempoala-La Bufa, denominado parque "Otomí-Mexica"*. Gobierno del Estado de México (GEM). https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2014/48/8/b1b1012efbfcf5d09faeb21adb0adf3c.pdf#:~:text=El%20Programa%20de%20Conservaci%C3%B3n%20y%20Manejo%20del%20Parque%20Estatal%20%22Otom%C3%89,parque%20sean%20compatibles%20con%20la
- Santiago, J. A. (2005). Determinación del uso potencial de la tierra con fines agrícolas en el municipio Bolívar, Estado Táchira. *Geoenseñanza*, 10(1), 69-85. <https://www.redalyc.org/pdf/360/36010105.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Ecosistemas Terrestres*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap2.html>
- Villegas, D., Gutiérrez, J. G., Gómez, W., & Espinosa, L. M. (2019). Procesos que influyen en las transformaciones territoriales de zonas bajo diferentes políticas de manejo ambiental en el Parque Otomí-Mexica del Estado de México. En M. V. Santana, R. M. Sánchez, F. Zepeda, J. R. Calderón & G. Santana (eds.), *Transformaciones territoriales en México y Polonia: Vulnerabilidad, resiliencia y ordenación territorial* (pp. 126-148). Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/104841>
- Villegas, D., & Gómez, W. (2020). Procesos locales de transformación que detonan el cambio de uso de suelo y vegetación en un área natural protegida de la Región Centro de México. *Acta Universitaria*, 30, e2864. doi: <http://doi.org/10.15174.au.2020.2864>